应用生态学

APPLIED ECOLOGY

张金屯　主　编
李素清　副主编



科 学 出 版 社

应用生态学

APPLIED ECOLOGY

张金屯 主 编
李素清 副主编

科学出版社
北 京

内 容 简 介

本书较系统、完整地概括了应用生态学的全貌，并反映了应用生态学研究的最新进展。全书以人与自然的协调发展为主线，以生态学原理为依据，以全球变化、环境保护、可持续发展等为重点，通过对地球自然-经济-社会复合系统的研究，揭示生态系统合理、安全运行的机制，寻求可持续发展的战略与模式。

本书可作为生态学、环境科学等相关专业的研究生教材，以及资源、环境等相关部门的科技工作者与管理人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

应用生态学/张金屯主编,李素清副主编.— 北京：科学出版社，2003

ISBN 7-03-010647-4

I. 应… II. ①张… ②李…III. 生态学–应用 IV. Q14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 054762 号

责任编辑：马学海 邱 璐 贾学文 / 责任校对：包志虹

责任印制：刘士平 / 封面设计：王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

http://www.sciencep.com

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003 年 3 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2003 年 3 月第一次印刷 印张：48

印数：1—2 000 字数：114 000

定价：78.00 元

（如有印装质量问题，我社负责调换〈环伟〉）

前 言

自 20 世纪 20 年代起，由于人口增长、工业发展、城市化速度加快，人类开始面临许多新的问题和挑战，例如人口问题、环境问题、资源问题、能源问题、粮食问题等，这些都涉及人类的生存与发展。尤其是 60 年代以后，这些问题日益严重，出现了多方面的危机。这些危机的控制和解决，都要以生态学为基础，因而引起各国政府和科学家对生态学的关注。生态学研究也因此而得到蓬勃发展，研究的重点也从理论生态学向应用生态学扩展，并且渗透到地学、经济学及农、林、牧、渔、医药卫生、环境保护、城乡建设等各个部门，从而使应用生态学成为内容丰富、多学科交叉、多分支的综合性学科。目前，应用生态学是与自然、社会、经济、文化等生产建设和实践关系最为密切的学科之一。

应用生态学的研究对象十分广泛，几乎包括了地球表面所有的生态系统类型。应用生态学的基本研究内容就是对与人类生产生活密切相关的生态系统的组成、形态、结构、功能、环境及由它们的变化而引起的生态系统生产能力的波动，生态环境的变迁，生态灾害的形成与防范，生态系统管理与调控等方面进行深入探讨，了解生态系统合理、安全运行机制，以求生态系统处于最佳运行状态，为人类谋求更大的利益。由于应用生态学内涵丰富，难以全面涵盖，本书只是涉及该学科的主要方面。对于各相关专业的研究生、科技工作者及管理者，本书基本上能够满足其需要。

本书共有 19 章。其中第一章、第二章和第十四章由张金屯撰写，第三章由李琪撰写，第四章由郭逍宇撰写，第五章由王琳撰写，第六章由上官铁梁撰写，第七章、第十章和第十一章由程占红撰写，第八章、第九章和第十五章由李斌撰写，第十二章由张桂莲撰写，第十三章由骆冬玲撰写，第十六章由张峰撰写，第十七章、第十八章和第十九章由李素清撰写。全书由张金屯统稿。

本书的出版得到了国家自然科学基金委员会和科学出版社的大力支持，在此特致谢意。由于作者水平所限，书中错误在所难免，敬请各位专家和读者不吝赐教。

张金屯

2002 年 2 月



目　录

第一章　绪　　论

第一节　应用生态学的概念和范围

一、应用生态学定义

“生态”一词是目前科技文献及报刊杂志使用最多的词汇之一，而“生态学”则是目前最常用的学科名称之一。首先我们来了解一下生态学的定义。对于生态学(ecology)的概念，不同的学者有不同的理解。德国动物学家 Haeckel(1866)最早给生态学下的定义是：生态学是研究有机体与其周围环境之间相互关系的科学。美国生态学家 Odum(1956)从生态系统的角度出发认为：生态学是研究生态系统结构和功能的科学。Hedgpeth(1969)认为生态学可定义为生物因素、社会因素和历史因素之间及它们内部的相互作用(interaction)，这些因素总是包围着一个人所在的家庭、学校、邻居及彼此重叠着的社会团体。这一定义把生态学与人类社会联系得更加紧密。我们认为，生态学是研究地球表面生命系统、环境系统和社会系统相互关系的学科，包括系统的结构、组成、功能、动态及其相互关系(图 1-1)。

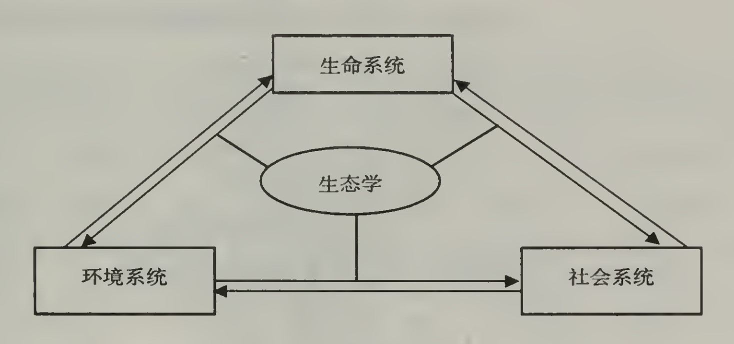


图 1-1　生态学关系图

生态学一般分为两大类，一是理论生态学(theoretical ecology)，二是应用生态学(applied ecology)。理论生态学研究生命系统、环境系统和社会系统相互作用的基本规律，建立关系模型，并据此预测系统的未来发展变化。应用生态学则是将理论生态学研究所得到的基本规律和关系应用到生态保护、生态管理和生态建设的实践中，使人类社会实践符合自然生态规律，使人和自然和谐相处、协调发展。

实际研究中，理论生态学和应用生态学是相互交叉的，很难明显分开，因为前者需要有研究对象的实例，而后者也要有适合研究对象的独特理论或模型。

二、应用生态学的研究内容

应用生态学的研究对象十分广泛，几乎涵盖了地球表面所有的生态系统类型，因此，它的研究内容也十分丰富。应用生态学的基本研究内容就是对与人类生产、生活密切相关的生态系统的组成、形态 、结构、功能、环境及由它们的变化而引起的生态系统生产能力的波动，生态环境的变迁，生态灾害的形成与防范，生态系统管理与调控等方面进行深入探讨，了解生态系统合理、安全运行机制，以求生态系统处于最佳运行状态，为人类谋求更大的利益。

应用生态学由于研究内容丰富，几乎涉及所有的产业部门和人类生活的各个方面， 因而产生了多个分支学科。根据各分支学科的特点，我们将生态学归为三大类：产业生态学(industrial ecology)、管理生态学(ecology of ecosystem management)和效益生态学(efficiency ecology)。产业生态学研究各大产业内部及与外部之间的生态关系，它追求产业在生态关系协调的前提下的高生产率，但生产率并不等于生产效益。各产业部门都有自己独特的生态系统和研究对象，因此就有自己独特的研究理论和方法。管理生态学主要研究某些特殊生态系统的管理理论、方法和策略，以及受损生态系统的修复理论和技术，保护生态系统平衡发展。效益生态学主要研究生态效益和经济效益的关系，它在生态效益不受损害的情况下，追求高的经济效益，但这种经济效益是以长期的持续的发展为特征的。而以上三大类又各含有多个分支学科，如图 1-2 所示。

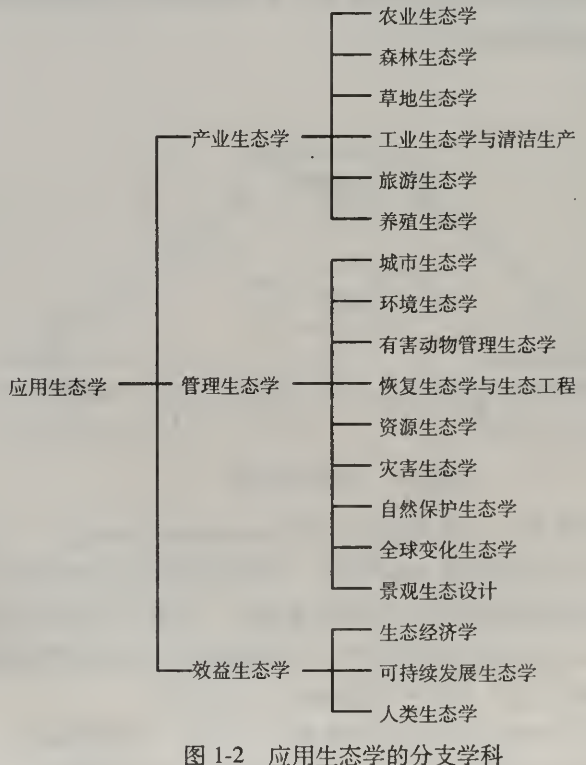


图 1-2　应用生态学的分支学科

图 1-2 中的分支学科是粗略的划分，实际上有的分支学科同时含有三大类特征，比如草地生态学，本身是产业生态学，但它也含有草地管理生态学和草地生态经济学等。

三、应用生态学研究的目的和意义

应用生态学与人类生产、生活、环境等诸多方面都有密切的关系，是人类认识自然生态系统，保护生态环境，创造生态价值，提高生产效率，维持全球生态良性循环的科学基础，也可以说它是人类赖以生存的科学基础之一。明白了这一点，就不难理解研究应用生态学的目的和意义了。

第二节　应用生态学发展简史

同其他的学科一样，生态学的实践和应用要比生态学理论早得多。人类在地球上一出现，就要寻觅食物，也就是要猎捕动物，采集植物果实等。他们知道什么样的动物生活在什么样的环境中，知道什么植物的果实何时成熟等，这实际上就含有生态学的知识和应用。但作为一门学科，应用生态学是在生态学建立之后逐渐发展起来的。

一、生态学理论的发展

生态学理论的形成和发展经历了一个漫长的历史过程。概括地讲，大致可分为四个时期：生态学的知识积累时期、生态学理论建立时期、生态学理论大发展时期和现代生态学理论时期。

1. 生态学知识积累时期(17 世纪之前)

在人类文明的早期，人类为了生存，不得不对其赖以果腹的动植物的生活习性及周围世界的各种自然现象进行观察。因此，从远古时代起，人们实际上就已在从事生态工作了。在古书中已记载有不少有关生态学的知识。早在 5000 年前我国的神农曾尝百草以鉴别各种植物。而相传公元前 11 世纪周公旦所撰《尔雅》一书就记载了 176 种木本植物和 50 多种草本植物的形态与生态环境。成书于战国时期的《管子·地员篇》专门论及水土和植物，记述了植物沿水分梯度的带状分布及土地的合理利用。公元前 100 年前后，我国农历已确立了 24 节气，它反映了作物、昆虫等生物现象与气候之间的关系。这一时期还出现了记述鸟类生态的《禽经》，记述了不少动物行为。在欧洲，亚里士多德(384~322　B. C.)在《自然史》一书中按栖息地把动物分为陆栖、水栖等大类，还按食性分为肉食、草食、杂食及特殊食性 4 类。亚里士多德的学生，古希腊著名学者 Theophrastus (370~285　B. C.)在其著作《植物群落》中曾经根据植物与环境的关系来区分不同树木类型，并注意到动物体色变化是对环境的适应。那时还没有生态学这一名词，也不可能使生态学发展成为独立的科学。

2. 生态学理论形成时期(17~19 世纪)

进入 17 世纪，随着人类社会经济的发展，生态学作为一门科学开始成长。例如，在 1670 年，著名化学家 Boyle 以无脊椎动物为材料研究了低气压对动物的影响，标志着动物生理生态学的开端；1735 年，昆虫学家 Reaumur 发现，就一物种而言，发育期间的气温总和对任一物候期都是一个常数，被认为是研究积温与昆虫发育理论的先驱；1855 年 Candolle 将积温引入植物生态学，为现代积温理论打下了基础；1765 年，Buffon 在《生命律》中，主要描述了生物与环境的关系；1792 年，德国植物学家 Willdenow 在《草学基础》一书详细讨论了气候、水分与高山深谷对植物分布的影响，他的学生 A. Humboldt 发扬了老师的思想，于 1807 年用法文出版《植物地理学知识》一书，提出“群落”、“外貌”等概念，并指出“等温线”对植物分布的意义；1798 年，Malthus《人口论》的发表，促进了达尔文“生存斗争”及“物种形成”理论的形成。

进入 19 世纪，生态学得到很快的发展并日趋成熟。1859 年，达尔文的《物种起源》问世，促进了生物与环境关系的研究，使不少生物学家开展了环境诱导生态变异的实验生态学工作。1866 年 Haeckel 提出生态学(ecology)一词，并首次提出了生态学定义。1877 年，德国学者 Mokius 提出了“生物群落”(biocoenosis)概念。丹麦植物学家 Warming 于 1895 年发表了他的划时代著作《以植物生态地理为基础的植物分布学》，1909 年经作者本人改写，用英文出版，改名为“植物生态学”(*Ecology of Plants*)；1898 年波恩大学教授 Schimper 出版《以生理为基础的植物地理学》：这两本书全面总结了 19 世纪末叶之前生态学的研究成果，被公认为是生态学的经典著作。Warming 和 Schimper 的不少弟子后来都成为著名生态学家，为生态学做出了重要贡献。

3. 生态学理论大发展时期(20 世纪前 50 年)

虽然前一时期随着生态学概念的提出，一些生态学研究专著也随之出版，但完整的生态学理论体系是在 20 世纪才逐步形成和完善的。像明确的个体生态学、种群生态学、群落生态学、生态系统生态学、数学生态学等分支学科的概念、理论和方法都是在这一时期形成和发展的。这一时期在动物生态学方面，生理生态学、动物行为生态学和动物群落生态学等研究有了较大进展，在此期间出版的有关著作有 Jennings(1906)的《无脊椎动物的行为》、美国生态学家 Shelford(1913)的《温带美洲的动物群落》等。在植物生态学方面出现了大量著作，例如，Klebs(1903)发表的《随人意的植物发育的改变》；美国 Cowels(1910)的《生态学》；Clements(1904,1907)的《植被结构与发展》和《生态学及生理学》；俄国学者 Sukachev(1908)的《布列扬斯克森林群系及它们的相互关系》；英国 A. G. Tansley(1939)的《英国的植被类型》等。1910 年，国际植物学大会正式采用了个体生态学和群体生态学术语，使生态学向更深更细的方向发展。

20 世纪 20~50 年代，生态学得到进一步巩固和发展。在动物生态学方面，开始了种群研究，并将统计学引入生态学，例如，英国生态学家 Lotka(1925)有关种群增长的数学模型，使数学生态学逐步形成，并被广大生态学者所接受。这一时期出版的动物生态学教科书和专著有：美国生态学家 Chapman(1931)的《动物生态学》；C. Elton(1927)

年的《动物生态学》；Shelford(1929)的《实验室及野外生态学》；中国费鸿年(1937)《动物生态学纲要》；前苏联 Kawkapob(1945)的《动物生态学基础》等。这一时期对动物个体生态、竞争理论、种群动态等进行了深入研究，形成了较完整的生态理论体系。1949年，Allee 等合著的《动物生态学原理》出版，被认为是动物生态学进入成熟时期的标志。植物生态学在这一时期也得到重要发展，出版的专著有：瑞典 Du Rietz(1921)的《近代植物社会学方法论基础》；法国 Braun-Blanquet(1928)的《植物社会学》；英国 Tansley(1923)的《实用植物生态学》；美国 Clements(1916)的《植物的演替》及 Clements 与 Weaver(1929)合著的《植物生态学》；前苏联 Sukachev(1908)的《植物群落学》等。由于各地自然条件、植物区系、植被特征与利用的巨大差异，使植物生态学在研究理论、研究方法、研究重点上有所不同，导致形成了不同的生态学派，主要有四大学派。

前苏联学派：主要代表人物有 Sukachev、Korovin、Dokhman，他们以欧亚大陆大草原和森林带为主要研究对象，注重植物群落与环境的联系，重视建群种与优势种，建立自己的植被等级分类系统，并重视植被生态、植被地理与植被制图工作。他们的工作以植物群落与植被地理为主，统称为“地植物学”(geobotany)。在 20 世纪 70 年代以前，前苏联学派对我国生态学影响较大。

英美学派：代表人物是英国的 Tansley 和美国的 Clements，研究对象主要是美洲大陆的植被，他们以研究植物群落的演替和创建顶级学说而著名，所以又被称为动态学派。他们在生态系统生态学、数学生态学、植被分类排序等诸多方面做出了重要贡献。

北欧学派(Uppsala 学派)：由瑞典 Uppsala 大学的 Sernauder 所创建，继承人为 Du Rietz，所以也叫做瑞典学派。他们在植物群落结构方面研究较细，强调环境，尤其是土壤环境与群落分布的一致性。研究对象主要是斯堪的纳维亚地区结构较单一的植被。后来该学派接受了不少法瑞学派的东西而与后者趋于一致。

法瑞学派：代表人物 Braun-Blanquet。它有两个研究基地，一个在瑞典苏黎世大学，另一个在法国蒙特利埃大学，所以又称苏黎世-蒙特利埃学派，他们联合创建了“国际高山和地中海地植物研究站”和“Rubel 地植物研究所”。他们把植物群落生态学称为“植物社会学”，并用特征种和区别种划分群落类型，建立了严密的植被等级分类系统。其研究方法首先要对样地中植物区系进行详细调查、记录和分析，所以又被称为植物区系学派，他们的植被分类以严格的群落排表而著称。1935 年瑞典学派与本学派合并，被称为欧洲大陆学派。这一时期随着学科的发展，英、美等国相继成立了生态学会，英国生态学会于 1913 年创建，美国生态学会于 1916 年创建；创办的一些生态学刊物有《生态学杂志》(*Journal of Ecology*)(1913)、《生态学》(*Ecology*)(1920)、《生态学专论》(*Ecological Monographs*)(1931)、《动物生态学杂志》(*Journal of Animal Ecology*)(1932)等。

到 20 世纪 50~60 年代，出现了一些新的生态研究中心。如德国的 Ellenberg 对生态幅度与生理幅度及生态组的研究；美国的 Pieolou 对数学生态学和生物多样性的研究；德国 Wurzburg 大学的 Lange 对植物生理生态的研究；英国北威尔士大学的 Harper 对植物种群的研究和 Greig-Smith 对植物数量生态学的研究；美国康奈尔大学 Whittaker 对植被梯度分析的研究等。

4. 现代生态学理论时期(20 世纪 60 年代至今)

这一时期生态学研究比以前各个时期都更为活跃，大部分国家成立了生态学会，并出版了自己的学术刊物，如《澳大利亚生态学杂志》(*Australian Journal of Ecology*)、《加拿大生态学杂志》(*Canadian Journal of Ecology*)、《生态学研究》(*Ecological Research*)、《热带生态学》(*Journal of Tropical Ecology*)、《功能生态学》(*Functional Ecology*)、《生态学杂志》、《生态学报》等。生态学研究对象已在宏观方向上扩展到生态系统、景观与全球生态研究。在生态系统水平上，对各生态类群的生产力、能量流动与物质循环研究取得了丰硕成果。景观生态学的形成与发展更加令人瞩目。美国景观生态学家 Forman(1986, 1995)出版了《景观生态学》(*Landscape Ecology*)和《土地镶嵌体——景观与区域生态学》(*Land Mosaic: Ecology of Landscape and Region*)两部书，对该方面的成就做了概括。对于全球变化、生物多样性、臭氧层空洞等研究也有了较大进展，从区域扩展到整个生物圈。生态学在宏观发展的同时，在微观方向上也取得了不少进展，近年来还出现了分子生态学(molecular ecology)等分支学科。并创刊了《分子生态学杂志》(*Journal of Molecular Ecology*)。这一时期研究手段进展很快。生态学研究中已广泛使用野外自动电子仪器(测定光合作用、呼吸作用、蒸腾作用、水分状况、叶面积、生物量与微循环等)、放射性同位素示踪(测定物质转移与物质循环等)、稳定性同位素(用于生物进化、物质循环、全球变化等)、遥感与地理信息系统(用于时空现象定量、定位与监测)、生态建模(从生态生理过程、斑块、种群、生态系统、景观到全球生态)等技术，支持了现代生态学的发展。特别值得提出的是，在生态系统整体研究中，由于系统结构与功能的复杂性，人们发现系统理论与系统分析是研究生态系统的有效工具，于是产生了系统生态学(system ecology)。近 30 年来电子计算机的迅速发展和应用，促进了生态系统建模与系统生态学的发展。

二、应用生态学的发展

应用生态学的发展同样经历了漫长历程，与生态学理论的发展相一致，但相对滞后于理论的发展。应用生态学大致可分为三个发展阶段：应用生态学萌芽阶段、应用生态学形成阶段和应用生态学大发展阶段。

1. 应用生态学萌芽阶段(19 世纪前)

这一阶段基本上与生态学理论发展阶段的“生态学知识积累时期”相对应。人类社会的早期，人们为了生存的需要，认识了动植物的生活习性，并应用于自身生产生活之中。我国古书《尔雅》中就记叙有多种动植物的生存环境及其用途，记载了乔木林用、草木药用等思想，实际上已牵涉到森林生态和草地生态之内容。在春秋战国时代，合理利用森林的思想也多有记载，比如:《孟子·梁惠王下》中说，“数罟不人洿池，鱼鳖不胜食也；斧斤以时如山林，林木不可胜用也”;《荀子·王制篇》中说，“斩伐养长，不失其时，故山林不童，而百姓有余材也”。这些都涉及应用生态学的内容，并可认为是持续发展思想的萌芽。在猎捕动物方面同样有类似的描述，如《吕氏春秋》中说：“竭泽而渔，岂不得鱼，而明年无鱼；焚薮而田，岂不获得，而明年无兽。”说的是若只顾

当年利益，破坏了动物的生存环境，则来年会无动物可猎。

中国古代在人口、人与土地和人与食物的关系上也体现了生态学思想。战国时的商鞅提出：在一个地区土地组成上，城镇道路应占 10%；主张农业人口与非农业人口的比例应为 100∶1。荀子也提出应减少工商人口。东汉时的崔寔提出人口合理布局的思想。这些都是城市生态与人口生态的思想萌芽。在国外，一些古老的城市，比如巴黎、伦敦等，17 世纪在设计上就特别注重古典学派思想的应用，把城市和广场构成美丽的图案，构图讲究整体效果等，这实际上是景观生态设计的早期工作。

这一时期由于生态学科本身没有形成，应用生态学也只是零散的一些思想而已，只能算是萌芽阶段，应用生态学的形成是要在生态学诞生后，并且理论上得到一定发展之后才可能实现。

2. 应用生态学形成阶段(1800~1910 年)

进入 19 世纪，各国农林牧渔等业都已比较发达，在生产中，生态学的思想已较为普遍。19 世纪末出版的《草业基础》就是最早的草地生态学专著；18 世纪到 19 世纪初，植物生态学从以植物区系为主要内容的植物地理学转变为以植被为主的植物地理学，注重群落的组成和结构，被叫做“生态植物地理学”，这时由于研究对象多为森林群落，实质上是森林生态学的内容，这一时期主要是 Humboldt 等人的工作。1822 年，丹麦学者 Schouw 提出了森林群落的命名方法，对群落生态学是一大促进。

18 世纪时，欧洲关于人与自然的关系问题存在两种意见：有的人认为人类与自然应该和谐相处，就像中国传统的“天人合一”思想；另一些人则认为人类有权力统治地球上的一切，有权征服和利用它们。后一思想得到了一些西方作家、画家、艺术家等人的赞赏。这一观点一直深刻地影响着人们的思想，直到 19 世纪中叶以后，人们才清醒地认识到保护自然的重要性。1864 年，Marsh 出版了《人和自然》一书，提出了“保护自然、长期利用”的观点。1870 年美国渔业协会成立；1872 年美国鱼类委员会成立；1875 年美国林业协会成立；1872 年美国建立了第一个国家公园——黄石公园(Yellow Stone)；1878 年英国议会通过了保护 Epping 森林的法规等。这些都是为了保护自然界的森林、草地及野生动物而诞生的行业管理委员会和法规，可以说此时自然保护生态学和人类生态学已经形成。1917 年，美国生态学会设立了为生态学研究服务的自然保护委员会，1920 年美国国家研究署指定生物和农学部考虑设立自然保护区的问题，使自然保护提高到了新的高度。

1874 年英国成立了旨在保护历史纪念地自然风景区的“国家信托公司”，主要保护土地和古建筑。1898 年又率先成立了“皇家河流污染委员会”，保护自然河流，这已是环境生态学形成的标志。这一时期，英美不少学者在 20 世纪初特别注意公园设计和城市规划，比如美国早期规划师 Olmsted(1822~1903)开创了美国城市规划和公园发展的新时代。在英国，Geddes 把植物学知识应用于城市规划，维持和发展了园林规划的传统。这里涉及了大量的景观规划生态学、旅游生态学等学科内容。1910 年地质学家 Shaler 出版了《人与地球》一书，清楚地表达了 20 世纪初生态学家的信念：人们生活在地球上，他们有权获得一份仅供自己使用的财富(资源)，但他们无权挥霍属于他们子孙的财富(资源)。这标志着蛮横利用自然时代的结束，可持续发展生态学思想的形成。

在这一阶段，大部分应用生态学分支学科已经形成，个别分支学科没有形成，但其思想已见雏形。

3. 应用生态学大发展阶段(1910 年至今)

从 20 世纪 20 年代开始，由于人口增长，工业发展，城市化速度加快，人类面临着许多新的问题和挑战，例如，人口问题、环境问题、资源问题、能源问题等，这些都涉及人类的存亡兴衰。上述问题的控制和解决，都要以应用生态学为基础，因而引起社会上对生态学的兴趣与关心。生态学研究不再限于生物学，而且渗透到地学、经济学及农、林、牧、渔、医药卫生、环境保护、城乡建设等各个部门，从而使应用生态学成为举世瞩目的多分支学科。

在这一阶段的早期，为了保护自然资源，各国资源调查工作迅速展开，英国成立了“植物调查委员会”、“皇家鸟类保护协会”等，对植被资源和鸟类资源进行大规模的调查研究。1911 年 Tansley 主编出版了《英伦三岛植被》，是植被资源生态学的经典之作。在美国，以 Clements 及其学生们为主的研究人员对北美植被进行大规模调查研究，Clements(1916)出版了《植物演替：植被发展分析》一书，对北美植被进行了较详细的记叙。著名动物生态学家 Shelford，在调查研究了大量的动物群落、动物资源的基础上，出版了《温带美洲的动物群落》(1913)一书。英国著名学者 Elton，在调查基础上，于 1927 年出版《动物生态学》一书，记叙了大量动物资源。在 1943 年他又出版了鼠类资源专著《田鼠、家鼠和旅鼠》。20 世纪 30 年代以后，尤其是第二次世界大战以后，世界范围内的自然资源调查迅速展开，各国都进行了普查工作，同时结合自然保护运动的兴起，许多国家都设立了自然保护委员会，并开始建立自然保护区。

在第二次世界大战尚未结束的时候，英国生态学会就成立了自然保护专业委员会，该委员会在 1945 年提议建立一系列国家级自然保护区。1949 年，“英国皇家自然保护管理委员会”成立，著名生态学家 Tansley 任主席。1959 年经该委员会批准的自然保护区已达 84 个，保护区面积已达 5.4 万 hm^2。1976 年，自然保护区已达 153 个，保护区面积 12.1 万 hm^2。在美国，生态学会一直很关注自然保护区工作，并直接资助这项事业，Shelford 为此做了大量工作。1946 年，Shelford 组织成立了“生态学家联盟”，1950 年改名“自然保护组织”，同年发表的报告，列出了美国和加拿大自然保护区一览表，有约 600 个保护区。到 1978 年，受该委员会赞助的研究项目已达到 2000 余个。自然保护区数已增加到 700 余个，保护区面积达 1.2 亿 hm^2，是世界上保护区面积最大的地区。在英美等发达国家和联合国的推动下，20 世纪 50 年代以后，全球性自然保护运动迅速发展，各国政府都十分重视这一活动，相继在自己的国土上建立自然保护区。目前，全世界已有自然保护区 6000 多个，保护区面积约 55 908 万 hm^2，自然保护运动的迅速发展是应用生态学大发展的一个重要标志。

20 世纪 30 年代以后，由于工业大发展，造成环境污染问题十分突出，国际上频频出现环境事故，世界上许多地区的大气环境、河流、水域受到不同程度的污染。农药的出现起初使农民的收益大增，但到 50~60 年代，杀虫剂带来的环境问题也显现出来。1962 年，美国学者 Carson 出版了《寂静的春天》一书，使人们清醒地认识到人类对环境的污染最终影响人类自己，向人类敲响了警钟。这促使不少学者进行环境生态研究，

促使各国政府大力治理污染，改善环境。由此，60 年代，全球性环境运动迅速展开，环境生态学也成为一门重要的应用生态学分支学科。

美国生态学会早在 20 世纪 40 年代就成立了“应用委员会”，第二次世界大战后他们就成立了“核辐射后果委员会”，开始了核辐射对环境和人类健康影响的研究。50 年代，委员会就批评政府在政治层次上对环境问题极不重视。

20 世纪 60 年代后期起，国际上出现了关心人类环境的高潮，美国生态学会应用委员会提出了“关于被遗弃土地的报告”(1967)和“环境规划问题报告”(1975)，自然保护组织还提出了“农业保护问题报告”(1977)等。此时，大众和传媒对应用生态学极为重视，认为生态学应加入“公众利益”和“政治学”成分，因为环境问题是国家安全的一个重要方面。1970 年，美国政府就成立了“环境保护局”，统一协调和管理生态系统及评价环境质量。1972 年联合国在斯德哥尔摩召开了有 114 个国家代表参加的“人类环境会议”。此后，许多国家都加强了环境问题的研究和治理，制定了不少有关环境问题的法规。在工业上提倡清洁生产工艺，到 80 年代初，发达国家的污染环境问题已基本得到解决。但对发展中国家来讲，环境问题至今仍未彻底解决，它与国家经济发展水平有密切关系。环境保护运动的兴起和发展也是应用生态学大发展的标志之一。

在 20 世纪 20~30 年代，人们对环境、生态、资源等问题的根源尚认识不清，并没有认识到人类本身是引起这些问题的根本因素，也没有看到生态环境研究对经济、社会的重大意义。虽然“人类生态学”一词当时已出现，但没有实质生态内容。1938 年，Alihan 出版了一本《社会生态学》著作，用了一些竞争原理研究社会问题。1940 年，美国生态学会发起了一个“人类生态学专题讨论”，1955 年美国生态学会成立了“人类生态学委员会”，1957 年该委员会召开了“人类生态学专题”讨论会，明确提出了“控制人口密度”、“用生态知识重新认识人类行为和文化问题”等思想，并对犹太-基督思想中的“生态破坏性”进行了批评。从 1960 年开始，生态学家更多地关注社会问题，而社会学家、经济学家也同时更关注生态、环境和资源问题，因此交叉性很强的应用生态学分支学科：人口生态学、经济生态学、文化生态学等相继出现并逐渐成熟，在社会发展中起到越来越大的作用，这也是应用生态学大发展的标志之一。

1972 年，一些英国生态学家回顾了世界经济增长和环境污染变化，发表了《生存的蓝图》研究报告，提出了“稳定社会”(stable society)的概念，认为目前社会的发展不会达到稳定社会的目标。同年，罗马俱乐部(Rome Club)发表了《增长的极限》(*Limits to Growth*)一书，认为应改变目前的增长趋势，并建立长远的持续的生态上和经济上稳定的条件，使每个人有平等的机会实现他个人的潜力，这是现代社会应追求的。这里已初步显现持续发展的思想。1987 年，联合国环境与发展委员会(The World Commission on Environment and Development)出版了《我们共同的未来》(*Our Common Future*)一书，该书是由 Brundtland 夫人领导的联合国“环境与发展委员会”的一份报告，又称《Brundtland 报告》。该书中明确提出了“持续发展”的定义，标志着持续发展生态学的诞生和兴起。随后世界自然保护联盟(IUCN)、联合国环境规划署(UNEP)和世界自然基金会(WWF)于 1991 年发表了《关心地球：一项持续生存的战略》。1992 年联合国在巴西里约热内卢举行了“环境与发展大会”(UNCED)，有 183 个国家代表团，70 多个国际组织的代表参加了会议，其中有 102 位国家元首或政府首脑亲自出席。大会发表了

《21 世纪议程》(*Agenda* 21)，提出了缓解环境伤害，走可持续发展道路的纲领、目标和措施。此后，可持续发展生态学研究迅速遍及全球各地，专著论文大幅增加，大部分国家政府均接受了“可持续发展”战略。可持续发展生态学现在仍处于研究高峰，也是应用生态学发展的重要标志。

自 20 世纪 70 年代后期起，人类又面临着许多新的环境和生态问题，比如，全球变化导致气候变暖、海平面升高、生命带的北界大幅北移；工业气体排放导致大气臭氧层破坏；气候变化导致干旱、洪涝等灾害频繁发生；人类活动导致森林破坏、森林面积大幅度减少，草地大面积退化，生物多样性减少，土地沙漠化扩展，沙尘暴屡屡出现，河流干涸，水资源告急等。这些问题的解决，都要以应用生态学为基础，因此，可以说，应用生态学现在仍在高速发展的阶段。

在应用生态学大发展阶段，不少国家的生态学会成立了应用生态学委员会，开展了应用生态研究。1964 年英国生态学会出版了《应用生态学杂志》(*Journal of Applied Ecology*)、1991 年美国生态学会出版《生态应用》(*Ecological Applications*)杂志、中国生态学会也出版了《应用生态学报》，另外，20 世纪 80~90 年代国际上还出版了各种应用生态学分支学科专门杂志，比如《城市生态》(*Urban Ecology*)、《保护生物学》(*Conservation Biology*)、《恢复生态学》(*Restoration Ecology*)、《森林生态和管理》(*Forest Ecology and Management*)、《环境管理杂志》(*Journal of Environmental Management*)、《应用植被科学》(*Applied Vegetation Science*)、《生态工程》(*Ecological Engineering*)、《经济生态学》(*Economic Ecology*)等。现在每年有大量的应用生态学论文发表，应用生态学是目前生态学中最有生命力的研究领域之一，并且在未来生态学发展中占有主导性地位。

第三节　应用生态学理论框架与研究方法

一、应用生态学理论框架

应用生态学的理论基础是生态学理论，主要包括个体生态学理论、种群生态学理论、群落生态学理论、生态系统生态学理论、景观生态学理论和数学生态学理论。应用生态学的研究对象主要是各类不同的生态系统，因此，其对生态学理论也有所偏重，其主要理论框架如图 1-3 所示。

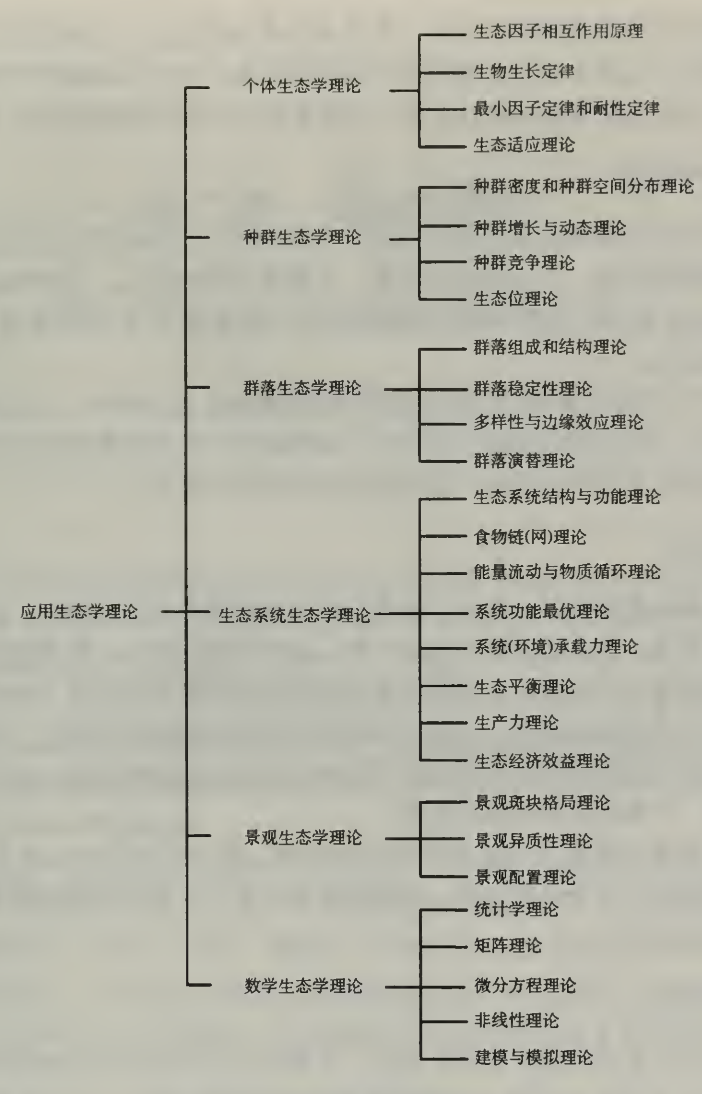


图 1-3　应用生态学的理论框架

二、应用生态学的研究方法

应用生态学理论包括了生态学领域的各个方面，因此，生态学研究方法都适合于应用生态学研究。应用生态学研究是以解决实际问题为主，所以，其研究方法以实验方法和调查统计分析为主，结合系统分析、综合归纳、动态模拟等，形成自己的研究方法体系。

1. 科学实验方法

这是应用生态学研究方法的主体之一。许多应用生态问题都要通过科学实验，搞清其机理，再相应提出措施，比如温度、湿度对林木生长的影响，水分对草地分布的影响，污染对鱼类的危害，鸟类分布与食物的关系等问题，都必须通过实验来找出答案。

科学实验分室内实验和野外实验，有的则是两者的结合，依所研究的问题而定。实验时间有短期的，也有中期和长期实验，像英国英格兰农业实验站的草地培肥实验已进行了数十年。实验方法有多种设计方案，请参考有关生态学基础理论的书。

2. 调查统计分析方法

调查统计是生态学最主要的研究方法，也是应用生态学研究的主体方法之一。像濒危保护生物的种群动态、人口数量及分布、资源现存量的变化、采用清洁生产工艺的企业数量等问题的解决，首先是通过调查统计，获得第一手资料数据，再分析其规律，提出解决方案。

调查统计本身有许多种方法，例如不定期普查、抽样调查、定点调查、问卷调查、连续调查、新技术调查(遥感调查)等，根据研究对象和所要解决的实际问题而定。对于特定的应用生态学分支学科，其调查方法相对较为固定。

3. 系统分析方法

生态系统是由各种要素、各个子系统组成的相互联系的有机整体。因此研究必须从系统学的角度出发，把生态系统作为一个统一的整体进行研究。数理统计学和数学的发展，为系统分析提供了方便。比如草地生态系统中的能量流动规律、森林生态系统中所有种群的变化与群落动态关系、流域治理过程中各种生态关系的变化、农药在生态系统中的运行规律等问题需要借助系统分析方法才能较确切地得到回答。通过系统分析可以建立系统模型，对系统进行模拟和预测。

系统分析中应用最多的方法包括多元统计学、多元分析方法、动态方程、分维几何、模糊数学理论、综合评判方法、神经网络理论等。计算机科学的发展大大促进了系统分析方法的应用。

4. 历史资料分析法

有一些应用生态学问题涉及历史变迁，需要从历史资料分析中得到启示。比如，区域生态环境变迁及其影响因素、自然灾害的发展及变化趋势、人均资源量的变化与发展、可持续发展思想的形成等问题需要查阅大量的历史记载。历史资料包括文献资料、考古成果、孢粉分析资料、地层分析资料、年轮分析资料等。

第二章　生态学基础

第一节　生态系统的概念及其组成

一、生物圈与生态系统的概念

(一) 生　物　圈

“生物圈”最早是由奥地利地质学家 Suess 于 1875 年提出的。20 世纪 20 年代苏联生物地球化学家 Верналский 注意到地球表面的化学物质的迁移和富集受生物活动的影响很大，他把充满生物活动的地球外壳称为“生物圈”(biosphere)。所以，生物圈是地球的一部分，其中存在有水、空气和土壤等维持生命活动所必须的物质的圈层。其范围上界从大气圈(atmosphere)对流层的顶部开始，包括岩石圈(lithosphere)上层到整个水圈(hydrosphere)，大约是地平面以上约 23km 和海平面以下约 12km。而生物的主体集中分布在地表上下约 100m 厚的范围。

地球上明显的生命活动大约出现于 25 亿~30 亿年前。生物的生命活动决定了地球土壤、水及大气圈的组成。光合生物，特别是绿色植物的发展，促进了大气圈成分的不断演化，逐渐形成了今天的大气圈。据估计，地球上的生物总量约有 10^{12}~10^{13}t，在大约 30 亿年的时期内，产生的生物总量约为地球地壳无机物总量的 2 倍。所有这些物质都参与地球的生物地质化学大循环，对生物圈的组成及发展起着重要的影响。

(二) 生　态　系　统

1935 年英国植物学家 Tansley 在前人工作的基础上，提出了生态系统(ecosystem)的概念，认为“生态系统的基本概念是物理学上使用的‘系统’整体，这个系统不仅包括有机复合体，而且也包括形成环境的整个物理因子复合体”，并强调有机体与环境之间，各种有机体之间及各环境组成要素之间的相互联系。生态系统是自然界的一种基本功能单位，它所具有的复杂的、纵横交错的网络式结构，只有在科学发展到一定程度的近代，才有可能对其进行深入研究，并使生态学及有关问题得到更快发展。

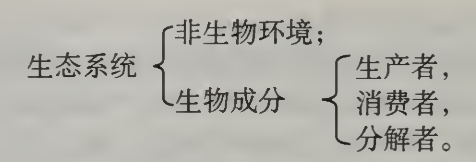
生物从环境中获取生活所需的物质和能量，并在生命活动过程中向周围环境排放某些物质和能量。不同的生物之间通过多种关系，如食物链(food chain)关系，相互联系在一起。环境中的各种要素也相互影响，相互制约。所以，生态系统可以理解为一定地域(空间)内，自下而上的所有生物和环境相互作用，具有能量转化、物质循环和信息传递

的统一体。

由此可以认为，生态系统是具有一定结构、一定边界的，但这个边界常常又是人们根据一定的条件和需要划定的。例如，一个池塘是一个生态系统。而在更大的范围内，包括池塘、农田、林地等在内的一个特定地区也可以视为一个生态系统。生态系统可以包含不同范围、不同层次，或者可以说只要是生物群体与其所处的环境组成的统一体， 都可以视为一个生态系统。在地球上，大气圈、水圈、土壤岩石圈相互作用形成适合于生物自下而上的环境，由这个环境及活动于其中的生物组成的生物圈，是地球上最大的生态系统。

二、生态系统的组分和结构

虽然不同的生态系统之间有很大的差别，但其基本组成都包括两部分：生物有机群和非生物环境，即：



生态系统各组分间的关系如图 2-1 所示。

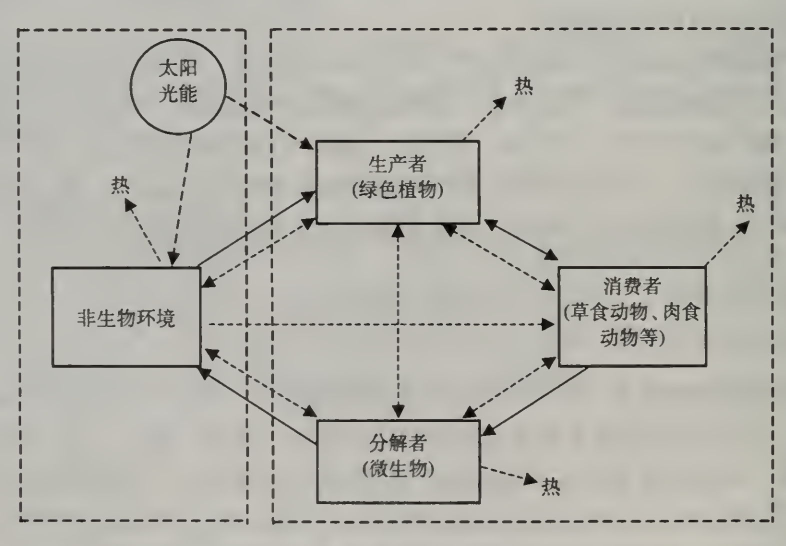


图 2-1 生态系统各组分间的关系

(一) 非生物环境

生态系统中所有发生的过程均受到自然环境的影响。例如，太阳为生态系统提供能量，气候、地形、土壤、水分、温度等也以各自的方式影响着生物。非生物成分指太阳

能和生态系统中所有不属于生物体的无机部分，包括水、空气(如氧气和二氧化碳)、矿物质(如铁和硫)、化合物(如酸及各式各样的复杂化学物质)，它们是生物赖以生存的物质和能量的源泉，并共同组成大气、水和土壤环境，成为生物活动的场所。

化学物质对于生命有机体的重要性随类型、地点、化合物的形式而改变。一些物质要比另一些对生命有机体的作用更为重要。有时某些化学物质数百万年深深埋藏于地壳之中，生命有机体无法与之接触；另一些虽然能够接触，但由于它们的物理或化学形式的缘故，生命有机体仍然难以利用。氮及其化合物在这方面提供了一个很好的例证，所有的生命有机体需要氮来制造蛋白质，氮元素在空气中占 80%，但是植物和动物一般不能直接利用气态氮。例如绝大多数植物只能吸收化合物(如硝酸盐)形式的氮作为自身的养料，因而有时须以化肥的形式向植物供氮。化学物质在一个生态系统中的种类和丰度还调节着系统中植物和动物的生命活动，甚至决定着动植物中某些种类在系统中能否生存。

生态系统中，生物也通过多种途径影响和控制非生物环境。如由于动物(如珊瑚虫等)和植物的活动，在海洋中建造起珊瑚岛。植物的呼吸作用向大气释放氧气，吸收二氧化碳与水，使大气中氧的含量增加，在地球生物进化中使高等生物进化和生存成为可能。海洋生物的活动在很大程度上影响着海洋及其底“泥”的化学组成。生态系统中生物要素与非生物环境要素相互制约、相互促进的过程中，表现的非生物环境对生物变化的影响和生物的生命活动对非生物环境的影响，通过一定的反馈机制的调控构成自然生态系统进化发展的基本动力。

(二) 生 物 成 分

1. 生物的基本组成

1) 生产者(producer)。指能直接利用太阳光能制造有机物质的自养(autotrophic)生物。主要是绿色植物，以及少数能自营生活的菌类。它们可以利用环境中的无机物合成为有机物质。绿色植物利用太阳能并将其转变为化学能，固定于有机物质中。化能合成细菌不能利用太阳能，而是通过氧化无机化合物获取能量，把二氧化碳和水合成为有机物质。生产者是生态系统的基础。

2) 消费者(consumer)。直接或者间接利用生产者制造的有机物质作为食物的异养(heterotrophic)生物。主要包括各种动物，如草食动物、肉食动物和寄生动物等，此外， 还包括一些寄生菌类。草食动物，直接利用绿色植物所制造的有机物质，如牛、羊及直接以植物茎、叶、种子等为食物来源的昆虫等，又称为初级消费者(primary consumer)。肉食动物，是以其他动物为其食物来源者，有的以草食动物为食，有的以其他的肉食动物为食，大者如虎、狼，小者如螳螂等，又被称为次级消费者(second consumer)。既食植物又食动物的称为杂食动物，如熊、麻雀等。此外，还有寄生于其他动物或植物体上，靠吸取寄主体的营养为生的动物，称为寄生动物，如赤眼蜂、虱子等。

3) 分解者(decomposer)。主要是指微生物，也包括部分以有机残屑为食的动物和腐

食动物。它们以动、植物残体和排泄物质为食物，经它们的活动把复杂的有机物质分解为简单的无机物，所以又称为还原者。经它们分解的无机物又可供生产者再次利用。它们的存在使各种有机物残体和排泄物不能大量积存，使物质再次进入新的循环过程，是生态系统保持不断发展的生命力。

2. 生物种群特征

(1) 种群概念及特征

生态系统中生物成分不论是生产者还是消费者和分解者，都包含了许多生物种类， 生物种类各自又形成了自己的种群(population)。种群是指一个生态系统中或一定区域内同一种生物的个体总和。例如油松林生态系统中的油松种群、四川卧龙自然保护区的大熊猫种群等。一个种群比生物个体对自然界有更大的适应能力，它们可以有效地抵御不良环境条件、共同对付天敌、共同寻觅食物等。种群具有密度、 多度、频度、分布格局、年龄结构、性比、盖度、优势度等生物个体所不具备的特征。

密度(density)是指单位面积或单位空间中种群的个体数。而多度(abundance)指一个生态系统中的种群个体总数。密度和多度有关系，都是反映个体数量的特征。频度(frequency)是反映种群个体在生态系统中分布均匀程度的指标，其与种群分布格局有密切关系。种群分布格局一般有三种类型：随机分布(random distribution)、均匀分布(regular distribution)、集群分布(clumped distribution)(图 2-2)。随机分布是个体出现在系统中的任何位置的概率是相等的；均匀分布是指个体间的距离是一致的分布；集群分布是个体成群分布。自然界中集群分布最为常见，随机分布也有，均匀分布一般只见于人工生态系统，比如农田、果园、人工林等。另外，还有一种动态分布叫扩散分布，见于动物种群，比如由卵块孵化的昆虫幼虫以卵块为中心向四周扩散的分布形式。

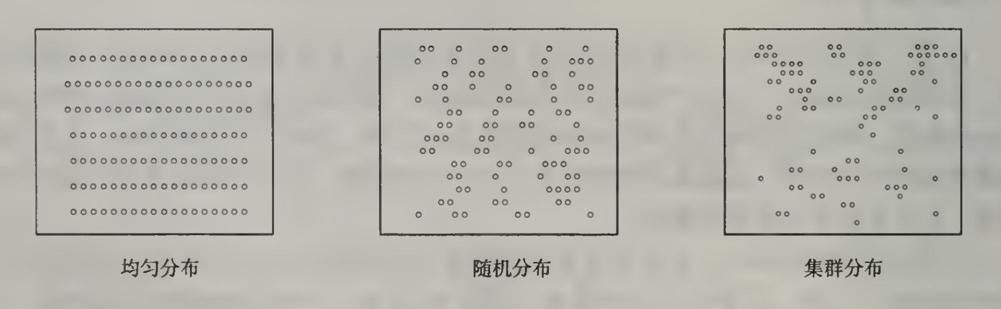


图 2-2　种群分布的三种类型

种群的年龄结构(age structure)是指不同年龄的个体在种群内的比例或配置情况，它反映种群的动态增长潜力。如果按年龄级(比如 0~4 龄、5~9 龄、10~14 龄等)统计各年龄组个体数占总数的百分比，并从幼龄到老龄作图，就得到年龄金字塔(age pyramid)。根据生育年龄和其他各年龄级个体的多少可将年龄结构区分为三种类型：增长型(图2-3a)、稳定型(图 2-3b)和衰退型(图 2-3c)。增长型结构表示种群中有大量幼体和极少数的老年个体，其出生率大于死亡率，是一个迅速增长的种群；稳定型表示种群出生率

与死亡率大致相平衡，种群稳定；衰退型则显示种群中幼体比例减少而老年个体比例增大，种群个体数量趋于下降。研究种群的年龄结构，对于了解种群的密度、预测未来发展趋势和采取相应管理措施具有重要的意义。

性比(sex ratio)是指种群中雄性个体数与雌性个体数的比例。不同的龄级，性比差别很大，性比对种群配偶关系及繁殖潜力有很大影响，从而影响种群的动态。

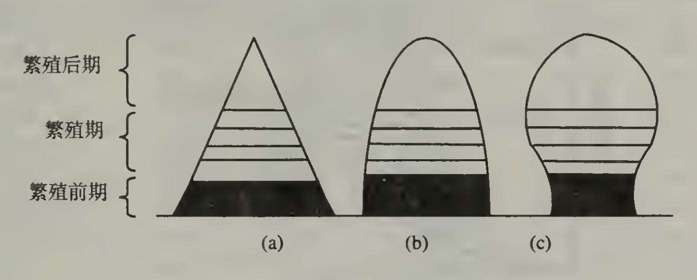


图 2-3　种群年龄结构的类型

种群的盖度(coverage)是指生产者种群覆盖生态系统的百分数，它反映了种群的作用大小。优势度(dominance)是指一个种群占优势的程度，同样反映种群在生态系统中的作用和地位。

(2) *种群增长与种群动态*

种群增长是指随时间变化种群个体数目增加的情况，体现着种群的动态特征。

1) 影响种群增长的因素。影响种群增长的因素来自两个方面：种群繁殖和迁移。繁殖(reproduction)能否使种群个体数量增加，取决于种群出生率与死亡率之间的对比关系。种群出生率的大小，决定于种群生物学特性和种群中具繁殖力的个体的数量，也决定于环境条件。种群死亡率则决定于食物的丰富程度、疾病、天敌捕杀和种群竞争等。当出生率大于死亡率时，种群个体数目增加，反之则减少。迁移(migration)则是种群个体从外部迁入某一生存空间或从内部迁出的现象，同样取决于该空间环境条件给予种群个体生存与发展的机会。迁入和迁出对种群的影响与出生和死亡对种群的影响类似。

2) 种群增长规律。种群生物潜力(biotic potential)是指物种的最大可能增长率，是物种在不受环境限制的理想情况下的增长率。这一增长率随物种而异，但对于特定的物种应是一个常数。为了说明种群在自然界的增长，让我们先从比较简单的情况谈起。

① 指数增长与 J 形曲线。如果系统中食物和空间充足，并无天敌与疾病和个体的迁入与迁出等因素存在的条件下，一个个体数目为 N 的单独种群将按其生物潜力所赋予的恒定瞬时增长率连续地增殖，即世代重叠时，该种群表现为指数式增长，用方程式表示为：

$$\mathrm{d}N/\mathrm{d}t = rN$$

其积分式为：

$$N_t = N_0 e^{rt}$$

式中：r 为种群内禀瞬时的增长率，t 为时间，N_0 为起始时种群的总个体数，N_t 为经时

间 t 后种群的总个体数。若用图表示，则呈现出一条个体数目不断增加的“J”形曲线(图 2-4 左)。

指数增长是无界的，种群如果按此方式增长，那么一个细菌经过 36h，完成 108 个世代后，将繁殖出 2^{107} 个细菌。

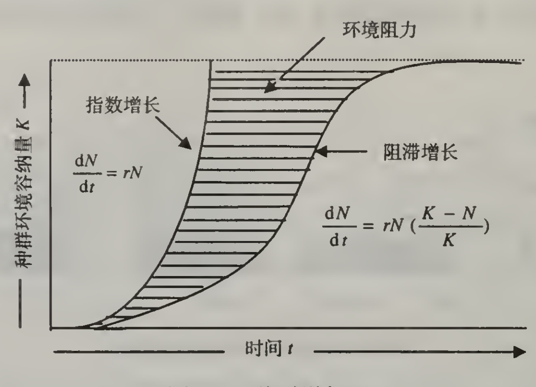


图 2-4　种群增长型

② Logistic 增长与 S 形曲线。实际上，上述按生物内在增长能力即生物潜力呈指数方式的增长在自然界不可能完全实现。这是因为环境中许多限制生物增长的生物与非生物因素，如食物和空间不足、疾病流行、天敌捕猎、种内和种间竞争、空间有限和气候条件不良等，必然影响到种群的出生率和存活数目，从而降低种群的实际增长率，使个体数目不可能无限制地增长下去。

通常是当种群侵入到一个新地区后，开始时增长较快，随后逐渐变慢，最后稳定在一定水平上，或者在这一水平上波动。此时个体数目接近或达到环境所能支持的最大容量或环境的最大负荷量 K。在这种有限制的环境条件下，种群的增长可用 Logistic 增长方程表示：

$$dN/dt = rN(1-N/K)$$

其积分式为

$$N_t = K/(1+e^{a-rt})$$

式中：K 为种群环境容纳量，a 为与种群起始数目 N_0 有关的参数，其余同前。这里 N/K 代表着那些阻碍种群不断增长的不利环境因素，统称为环境阻力(environmental resistance)，它随种群个体数目的增加而加大。在此种情况下，种群增长曲线呈“S”形(图 2-4 右)。一般认为这种曲线更接近于自然界种群增长的动态实际。

3) 种群生命表。生命表(life table)是记录种群任一龄级生命过程中的个体数目变化及各龄级个体数比例的表格，它是统计种群死亡过程的工具，在人口统计学、动物生态学中有广泛的应用。表 2-1 就是生命表的一个例子。

表中 x 为年龄级；n_x 为 x 期开始时的存活数；l_x 为 x 期开始时的存活率；d_x 为从 x 到 x+1 的死亡数；q_x 为从 x 到 x+1 的死亡率；e_x 为 x 期开始时的生命期望或平均余年。$L_x=n_x/n_0$，$d_x=n_x-n_{x+1}$，$q_x=d_x/n_x$，$e_x=T_x/n$。

T_x 和 L_x 栏一般可不列入表中。L_x 是从 x 到 x+1 期的平均存活数，即 $l_x=(n_x+n_{x+1})/2$。T_x 则是进入 x 龄期的全部个体在进入 x 期以后的存活个体总年数，即 $T_x=\sum L_x$。例如，$T_0=L_0+L_1+L_2+L_3+\cdots$，$T_1=L_1+L_2+L_3+\cdots$

表 2-1　藤壶的生命表

年龄(x)	存活数(n_x)	存活率(l_x)	死亡数(d_x)	死亡率(q_x)	L_x	T_x	生命期望(e_x)
0	142.0	1.000	80.0	0.563	102	224	1.58
1	62.0	0.437	28.0	0.452	48	122	1.97
2	34.0	0.239	14.0	0.412	27	74	2.18
3	20.0	0.141	4.5	0.225	17.75	47	2.35
4	15.5	0.109	4.5	0.290	13.25	29.25	1.89
5	11.0	0.077	4.5	0.409	8.75	16	1.45
6	6.5	0.046	4.5	0.692	4.25	7.25	1.12
7	2.0	0.014	0	0.000	2	3	1.50
8	2.0	0.014	2.0	1.000	1	1	0.50
9	0	0	---	---	0	0	---

引自 Krebs　1978

4) 存活曲线。根据生命表中的信息，就可以绘出种群的存活曲线或死亡曲线。不同种群的个体，寿命长短各有差异，在各年龄段上的存活率也不同，一般有三类不同形式的存活曲线(survivorship curve)。这些曲线直观地表现出种群中个体的存活过程(图 2-5)。

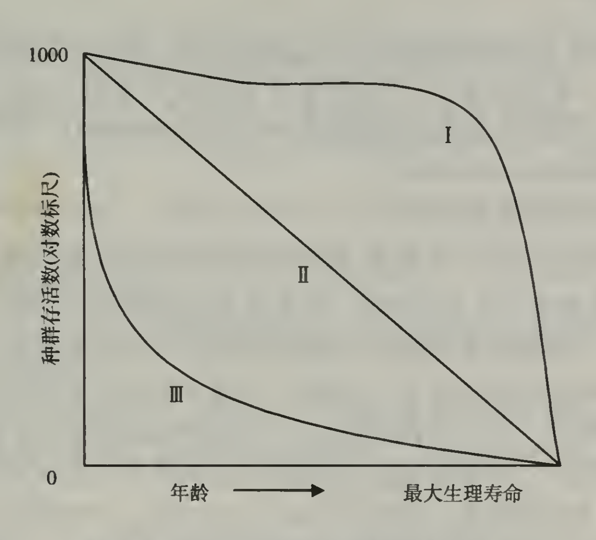


图 2-5　种群存活曲线的三种基本类型

Ⅰ型：曲线凸型，表示在接近生理寿命前种群内只有少数个体死亡，例如大型兽类和人的存活曲线。

Ⅱ型：曲线对角线型，种群个体各年龄段死亡率相等，如许多鸟类接近于此型。

Ⅲ型：曲线凹型，幼年期死亡率很高，随后死亡率降低。

5) 种群调节的反馈控制机制。自然界中存在两种基本的环境阻力：密度制约和非密度制约因素。

密度制约因素(density-dependent factor)是指那些随种群个体数目增长而逐渐加大其负面影响力度的环境因素，包括觅食难易度、生境适宜度、病虫害及天敌等。这类因素制约种群增长的机制，在于它们影响个体能否存活及繁殖新个体的水平。例如，高的种群密度会吸引更多的捕食者，更易传播疾病和造成食物缺乏。这些反过来又影响到种群每一个体的存活和每一雌体的平均生育水平。

非密度制约因素(density-independent factor)是指那些与种群个体数目无关，在任何时候都对种群施加同样负面影响的环境因素。恶劣的气候和天气条件无论何时何地均要干扰种群的增长；化学污染物也同样如此。

一般地，密度制约因素似乎更能有效地控制种群数量。随着种群密度的不断增长， 密度制约因素施加的调节压力越来越大，种群增长趋于缓慢，直至种群数量逐渐稳定在 K 值附近。这时的种群个体数目，称为(该种群在该环境条件下的)环境容纳量(environmental carrying capacity)(图 2-4)。它是生物潜力与环境阻力在理论上的平衡点。同样，当种群密度减小到低于环境容纳量时，生存条件又变得比较充裕，个体数目又趋于增长，从而使种群大小和密度被控制在一定水平上。由此可见，种群也是一个控制系统，即通过环境阻力的负反馈机制(negative feedback mechanism)使促进种群潜在增长力发展的正反馈受到限制而实现自我调节，将种群数量维持在某种平衡状态。

3. 生物群落及其特征

生态系统中的所有生物种群相互依存，相互作用，形成一个有机的整体，称为生物群落(community)。由生态系统中所有植物所组成的群落，称之为植物群落(plant community)，动物所组成的群落叫动物群落(animal community)，微生物组成的群落叫微生物群落(microbiological community)。

(1) 生物群落的组成和结构

1) 群落的种类组成。生物群落中所含的生物种类叫做种类组成(floristic composition)，它是群落最基本的特征，种类组成在植物群落学研究中用得最多，调查方法也比较成熟，对动物群落和微生物群落的研究现在也逐步重视这一特征。在植物群落学中，理论上讲种类组成应含有一切植物，不管它们是低等的还是高等的，也不管它们在群落中的数量多少，以及占据空间大小，凡是群落内的所有植物，都是该群落的组成者。但在实际研究中，种类组成仅指该群落中的高等植物或维管植物等。调查一个群落的种类组成，一般用群落最小面积(minimal community area)确定样方的大小，群落最小面积是指群落中大多数种类都能够出现的最小样方面积，一般用种类-面积曲线(species-area curve)确定。

群落中的物种很多，它们的功能和地位是不同的。对群落有建设性作用的物种叫做建群种(constructive species)，它是群落主要层的优势种(dominant species)。优势种是指群落每一层中占优势的种类，群落中有的层中只有一个优势种，有的层有两个或三个优势种，称为共优种(common dominant species)。

2) 群落的结构。群落的结构研究主要集中于植物群落中，因为动物群落和微生物群落的结构取决于植物群落。在植物群落中，生活型与结构有密切关系。

① 生活型(life form)。生活型是生物对外界环境适应的外部表现形式，同一生活型的生物，不但体态相似，而且在适应特点上也是相似的。植物生活型的研究工作较多，最著名的是丹麦生态学家 Raunkiaer 生活型系统，他选择休眠芽在不良季节的着生位置作为划分生活型的标准，其既反映了植物对环境(主要是气候)的适应特点，又简单明确，这一标准把陆生植物划分为五类生活型(图 2-6)。



图 2-6 Raunkiaer 生活型图解(引自 Raunkiaer 1934)

1. 高位芽植物；2~3. 地上芽植物；4. 地面芽植物；5~9. 地下芽植物。
图中黑色部分为多年生，非黑色部分当年枯死

高位芽植物(phanerophyte)：严酷环境来临时，休眠芽位于距地面 25cm 以上。又依高度分为四个亚类，即大高位芽植物(高度>30m)，中高位芽植物(8~30m)，小高位芽植物(2~8m)与矮高位芽植物(0.25~2m)。

地上芽植物(chamaephyte)：严酷环境来临时，更新芽位于土壤表面之上、25cm 之下，多为半灌木或草本植物。

地面芽植物(hemicryptophyte)：又称浅地下芽植物或半隐芽植物，严酷环境来临时，更新芽位于近地面土层内，受枯叶和土壤保护，冬季地上部分全枯死，即为多年生草本植物。

隐芽植物(cryptophyte)：严酷环境来临时，更新芽位于地下较深土层中或水中，多为鳞茎类、块茎类和根茎类多年生草本植物或水生植物。

一年生植物(therophyte)：严酷环境来临时，已完成生命周期，以种子越冬。

② 群落的垂直结构。群落的垂直结构(vertical structure)主要指群落分层现象。陆地群落的分层，与光的利用有关。森林群落的林冠层吸收了大部分光辐射，往下光照强度渐减，并依次发展为林冠层、灌木层、草本层和地被层等层次。

群落的成层性包括地上成层与地下成层，层(layer)的分化主要决定于植物的生活型，因生活型决定了该种处于地面以上不同的高度和地面以下不同的深度；换句话说，陆生群落的成层结构是不同高度的植物或不同生活型的植物在空间上垂直排列的结果，水生群落则在水面以下不同深度分层排列。一般讲，温带常绿阔叶林的地上成层现象(stratification)最为明显，寒温带针叶林的成层结构简单，而热带森林的成层结构最为复杂。在层次划分时，将不同高度的乔木幼苗划入实际所逗留的层中，其他生活型的植物也是如此。另外，生活在乔木不同部位的地衣、藻类、藤本及攀援植物等层间植物(interstratum plant)通常也归入相应的层中。

植物群落的地下成层性是由不同植物的根系在土壤中达到的深度不同而形成的。最大的根系生物量集中在表层，土层越深，根量越少。根系成层可以充分利用土壤中的养分和水分。

成层结构是自然选择的结果，它显著提高了植物利用环境资源的能力，如在发育成熟的森林中，上层乔木可以充分利用阳光，而林冠下为那些能有效地利用弱光的下木所占据。穿过乔木层的光，有时仅占到达树冠的全光照的十分之一，但林下灌木层却能利用这些微弱的、光谱组成已被改变了的光。在灌木层下的草本层能够利用更微弱的光，草本层往下还有更耐荫的苔藓层。

生物群落中动物的分层现象也很普遍。动物之所以有分层现象，主要与食物有关，因为群落的不同层次提供不同食物；其次还与不同层次的微气候条件有关。如在欧亚大陆北方针叶林区，在地被层和草本层中，栖息着两栖类、爬行类、鸟类(丘鹬、榛鸡)、兽类(黄鼬)和各种鼠形啮齿类；在森林的灌木层和幼树层中，栖息着莺、苇莺和花鼠等；在森林的中层栖息着山雀、啄木鸟、松鼠和貂等；而在树冠层则栖息着柳莺、交嘴和戴菊等。应指出，许多动物可同时利用几个不同层次，但总有一个最喜好的层次。

水域中，某些水生动物也有分层现象。比如湖泊和海洋的浮游动物即表现出明显的垂直分层现象。影响浮游动物垂直分布的原因主要决定于阳光、温度、食物和含氧量等。

③ 群落的水平结构。群落的水平结构(horizontal structure)是指群落的水平配置状况或水平格局，重点是群落的镶嵌性与复合体。

镶嵌性(mosaic)：种群或种群组合在二维空间中的不均匀配置，使群落在外形上表现为斑块相间，我们称之为镶嵌性，具有这种特征的植物群落叫做镶嵌群落(mosaic community)。每一个斑块就是一个小群落，它们彼此组合，形成了群落的镶嵌性。群落内部环境因子的不均匀性，例如小地形和微地形的变化，土壤温度和盐渍化程度的差异及人与动物的影响，是群落形成镶嵌性的主要原因。内蒙古草原上锦鸡儿(*Caragana*)是灌丛草原镶嵌群落的典型例子。在这些群落中往往形成 1~5m 呈圆形或半圆形的锦鸡儿丘阜。这些锦鸡儿小群落具有重要的生态意义和生产意义。它们可以聚积细土、枯枝落叶和雪，因而使其内部具有较好的水分和养分条件，形成一个局部优越的小环境。小群落内部的植物较周围环境中返青早，生长发育好，有时还可以遇到一系列越带分布的植物，例如在灌丛化荒漠草原中，有典型草原的成分。自然界中群落的镶嵌性是普遍的和绝对的，而均匀性是相对的。

(2) 生态位和物种多样性

1) 生态位。在生态学中最早使用生态位(niche)一词的是 Grinnel(1917)，他把生态位定义为种的最后分布单位(ultimate distributional unit)，强调生态位的空间概念。1927年，Elton 把生态位确定为种在其群落中的功能作用和地位(functional role and position)，强调一个种与其他种的营养关系。Hutchinson(1957)利用数学上的点集理论，把生态位看成是一个种自下而上条件的总和。Odum(1959)则认为生态位是一个种在其群落和生态系统中的地位和状况，而这种地位和状况决定于该生物的形态适应、生理反应和特有的行为。1973 年， Pianka 提出一个生物单位的生态位(包括个体、种群或物种生态位)，就是该生物单位适应性的总和。生物环境(小生境)与生物生态位之间的差异仅仅在于：在生物生态位的概念中，包括生物开拓和利用其环境的能力，也包括生物与环境相互作用的各种方式。目前，生态位的概念已同种间竞争密切联系在一起，而且越来越同资源的利用联系在一起。

在生态位研究中，有两个重要指标，一是生态位宽度，二是生态重叠。生态位的宽度或广度(niche breadth)是指一个种群(或其他生物单位)所利用的各种不同资源的总和。在可利用资源量较少的情况下，生态位宽度一般应该增加，以使种群得到足够的资源。在可利用资源量丰富的环境中，可导致选择性利用资源(选择采食等)，使得生态位宽度变窄。一个种的生态位越宽，该物种的特化程度就越小，也就是说它更倾向于是一个泛化种；相反，一个种的生态位越窄，该种的特化程度就越强，即它更倾向于是一个特化种。泛化种，生态位宽，具有较强的竞争能力，尤其是在可利用资源量非常有限的情况下，更是如此；而特化种生态位窄，在资源竞争中处于劣势。

当两个物种利用同一资源或共同占有某一资源因素(食物、营养成分、空间等)时，就会出现生态位重叠现象(niche overlap)。在这种情况下，就会被两个生态位所共占，假如两个物种具有完全一样的生态位，就叫完全重叠(complete overlap)。但多数情况下，生态位之间只会发生部分重叠，即一部分资源是被共同利用的，而其他部分则分别被各自所占据。

2) 物种多样性。物种多样性(species diversity)是生物多样性的一类。生物多样性(biodiversity)是地球上所有生命的总和，是 40 亿年来生物进化的最终结果，它是多样化的生命实体群的特征。生物多样性一般分四类：遗传多样性、物种多样性、生态系统多样性和景观多样性。

遗传多样性(genetic diversity)是指种类基因的多样化，包括种类显著不同的种群间和同一种群内的遗传变异。物种多样性是指物种水平上的生物多样性，它是用一定空间范围物种的数量和分布特征来衡量的。生态系统多样性(ecosystem diversity)是指生物圈内生境、生物群落和生态过程的多样化及生态系统内生境差异及生态过程的多样性。景观多样性(landscape diversity)主要研究地球上各种生态系统相互配置。景观格局及其动态变化的多样化。在群落学和生态系统研究中，物种多样性是其主要内容之一，物种多样性的变化可以指示生态系统的变化。

物种多样性实际上有三种含义：

种的丰富度(species richness)或多度(abundance)，这是指一个群落或生态系统中种的

数量的多寡。1974 年 Poole 说只有这个指标才是惟一真正客观的多样性指标。在统计种的数目的时候，都需要说明多大的调查面积，以便比较。在多层森林里必须说明层次和径级。

种均匀度(species evenness)或平衡性(equitability)，种均匀度是指一个群落或生境中全部种的个体数目的分布情况，它反映了种属组成的均匀程度。例如某一群落中有 100 个个体，其中 90 个属于一个种，10 个属于另一种。还有一个群落中也有 100 个个体，两个种各居一半，那么前者的均匀度就比后者要低得多。在这种情况下，实际上减低了种数目的重要性，而强调了个体数目的重要性。

种的总多样性(total diversity)，这是上述两种含义的综合，又称种不齐性(species heterogeneity)。Simpson(1949)是第一次这样用的，二者合在一起实际是强调了个体数目，所以又有人就称之为优势度多样性(dominance diversity)。

(3) *群落中种间关系*

从群落的定义出发，群落的物种种群间存在着复杂的相互作用。这些相互作用有直接影响和间接影响，有有利的与不利的作用。归纳起来，主要有下列几种形式。

竞争(competition)是物种内或物种间为争夺生存资源和空间而相互抑制的现象。竞争对双方都不利。1934 年，Gause 经实验证明，当两个生态习性相近的物种生活在一起时，它们之间会因食物和空间资源有限而产生竞争。其结果要么是一种存活一种死亡；要么是一种退居他处；要么虽共居一处但一种的食性发生改变。换言之，两个生态习性相近的物种不能同时占据相同的生态位。这就是竞争排斥原理(competitive exclusion principle)。竞争往往发生在彼此共同需要的资源和空间有限而物种的个体密度过大的情况中。如森林的自疏和兽类为取得交配权而争斗是种内的竞争例子；田间杂草和农作物争夺水肥则是种间竞争。

共生(symbiosis)是两种不同的生物生活在一起，互相依赖，彼此均获利的一种种间相互作用方式。固氮根瘤菌与豆科植物的相互依存是典型的共生例子，蜜蜂与植物花的关系也可认为是一种互惠共生。

化感作用(allelopathy)是指一种植物通过向体外分泌代谢过程中的化学物质，对其他植物产生直接或间接的影响。比如黑核桃的树皮和果实可以分泌氢化核桃酮，当其被雨水冲淋到土壤中时，对其他植物生长有抑制作用，因此，黑核桃树下很少有草本植物生长。

寄生(parasitism)是一个物种(寄生物)的个体生活在另一物种(寄主)的体内或体表，并从寄主身上取得营养的现象。寄生是弱者依附于强者的表现，虽对寄主有害，但一般不伤及生命，如虱子寄生于人体、槲寄生寄生于栎类(*Quercus*)树上等。

偏利共栖(commensalism)为两种生物生活在一起，其中一方受益，另一方并不受害也无利，如海洋中的一种小鱼——短鲫(Remoras)将自己吸附在鲨鱼的体表，免费乘鲨鱼旅行，并以吃鲨鱼进食后剩下的残余为生。鲨鱼虽然未获得利益，但也无大碍。

捕食(predation)是一种生物攻击、损伤或捕杀另一种生物并以后者为食的现象。捕食者因获得食物而受益，被捕食者则受到抑制或死亡。例如斑马吃草和狮子捕食羚羊等。 捕食作用并不一定总是有害，因为猎物往往首先是被捕食种群中的老弱病残，通

过捕食有利于淘汰劣弱，控制种群的个体数量，维持种群间和生物与环境间的平衡，对生态系统有积极作用。

(4) *群落生态演替*

生物群落是不断发展变化的，其分为周期性变化和群落演替两种。周期性变化(periodical change)，比如季节变化、年龄变化等。群落生态演替(ecological succession)是群落的长期变化，是指一个群落被另一群落所取代的过程，是生物与其环境长期作用的结果。生物在生态系统中受环境制约着，反过来生物的生长发育也改变着环境本身，而改变了的环境又反过来作用于生物体，长此以往，新的环境对原有生物种来说可能不太适应，这些种衰退，而对新环境更适应的种类迁入，这样群落的种类和结构发生变化， 逐步形成一个新的群落，群落生态演替一般是在裸地上发生的。依裸地的性质不同演替可分为原生演替和次生演替，按照演替的方向可分为进展演替和逆行演替。

原生演替(primary succession)指发生在原生裸地上的演替，即出现在以前没有植物覆被的裸地上，如露天矿山废弃地、大规模自然灾害如火山爆发后的地表等。次生演替(secondary succession)是指发生在次生裸地上，即在原来有过植物覆被，以后由于种种原因植被被毁灭，但土壤中常常还保留有植物的种子或其他繁殖体的裸地上。次生演替比较普遍，例如在撂荒农田、砍伐过的林地及自然灾害后的废墟上发生的演替等。

在演替过程中，不仅植物覆被逐渐发生量和质的变化，而且以特定植物种为生的动物种类也相应发生改变。

演替的发展变化总趋势朝着逐渐符合当地生态环境条件的方向进行，称为进展演替(progressive succession)。进展演替的结果是，群落一般表现为种类组成多样性有所增加，生态位分化和结构变得较原来复杂，同时群落对环境资源的利用也越来越充分。与之相反，群落由于受到干扰破坏而驱使演替过程倒退称为逆行演替(retrogressive succession)。逆行演替多样性降低，种间关系和群落结构趋于简单化，生产力降低，像我国大面积的退化草地就是逆行演替的结果。

无论演替最初是在何种环境条件下发生，若时间足够长且无外界因素干扰，演替将会不断地向前进行，经过一系列的过渡阶段群落(称为演替系列)，最终将达到一个与当地大气候及土壤等生态环境条件相适应的、组成和结构相对稳定的群落，即演替顶极群落(climax)。维持顶极群落稳定状态(homeostasis)的是类似于种群调节的负反馈机制。除非有大的气候变动或人为活动干扰使群落发生根本变化，顶极群落将可以长期存在下去。人类活动等干扰可以改变演替的方向和速度。例如农、林、牧业生产实践中， 不合理开垦带来的水土流失、草地退化，往往阻碍或延缓群落向顶极状态演替，是逆行演替；处在流域下游的湖泊因上游水土流失冲刷下来的泥沙淤塞而加速向陆生群落演替。认识群落演替的性质，预测其发展方向，有助于合理利用和保护人类赖以生存的环境中的生物资源。

三、生态系统的类型

生态系统组成的生物种类差别很大，比如植物种类的分布在热带与温带有明显的不同。非生物环境因素随时间空间的变化更是有很大的不同，比如随着生态系统和地理位

置的变化，光辐射、温度、降水、土壤等环境因素表现出很大的差异。因此不同的生态系统都具有自身的独特结构，表现出不同的特征。这是生态系统进化发展的结果。由此形成了地球上多种多样的自然生态系统。人类出现以来，在人的活动参与下，为了满足人们的某种需要，运用所掌握的技术手段，建立了多种特殊的人工(或半人工)生态系统。实践中对这些生态系统加以分类是非常必要的，但目前尚无统一的分类标准，习惯上主要根据环境性质将其划分为陆生生态系统和水生生态系统。再根据水环境的物理化学性质，还可再将水生生态系统分为若干个子系统。根据水热环境、纬度地带等也可将陆地生态系统分为多个子系统(表 2-2)。

表 2-2　生态系统分类简表

1. 水生生态系统	3. 陆地生态系统
I. 淡水生态系统	V. 荒漠生态系统
(1) 流水生态系统	(1) 干荒漠生态系统
A. 急流水生态系统	(2) 冻荒漠生态系统
B. 缓流水生态系统	VI. 冻原生态系统
(2) 静水水生生态系统	(1) 极地冻原生态系统
A. 沿岸水生生态系统	(2) 高山冻原生态系统
B. 表层水生生态系统	VII. 草原生态系统
C. 深层水生生态系统	(1) 干草原生态系统
II. 海洋生态系统	(2) 湿草原生态系统
(1) 海岸生态系统	VIII. 稀树草原生态系统
A. 岩岸水生生态系统	IX. 草甸生态系统
B. 沙岸水生生态系统	X. 灌丛生态系统
(2) 浅海(大陆架)生态系统	XI. 温带针叶林生态系统
(3) 珊瑚礁生态系统	XII. 温带落叶阔叶林生态系统
(4) 远洋生态系统	XIII. 亚热带常绿阔叶林生态系统
A. 远洋上层生态系统	XIV. 热带森林生态系统
B. 远洋中层生态系统	(1) 雨林生态系统
C. 远洋深海生态系统	(2) 季雨林生态系统
D. 远洋底层生态系统	4. 人工生态系统
2. 湿地生态系统	XV. 农田生态系统
III. 沼泽生态系统	XVI. 城市生态系统
IV. 海岸湿地生态系统	

四、人类在生态系统中的位置

1. 人是生态系统进化的产物

这里讨论人与生态系统的关系，主要是从生物圈这一大系统基础上来讲的。生物圈的进化与发展是生物与环境相互作用的结果。在大约 300 万年前，人类通过劳动从类人猿分化出来，形成为具有高度发达智慧的、与其他物种不同的、生物圈中最高级的物

种。所以，人是由生物圈进化发展的产物，也是生态系统的组成要素；人也具有一般生物共有的自然属性，也遵循生长、发育、衰老、死亡、遗传与变异等自然规律；存在着与环境进行物质与能量交换、相互作用、相互影响的密切关系。所以，人类的生存与发展必然也要受到一般的生物学规律的制约。但是，因为与一般生物相比，人又具有高度发达的脑和智慧，能进行复杂的劳动，因此，决定了人不同于其他生物与环境之间的一般关系。

生态系统中形形色色的物种都处于各自相应的位置上，都占有自身的生态位。人类以其独特的身份在生态系统中占据了独一无二的优势种群地位。随着人类掌握的科学技术水平的提高，这种地位不断加强。在人类依靠采集、狩猎为生的原始时期，其生存与发展主要决定于自然生态系统的生产力，人口增加主要也受种群增长规律的强力制约。

2. 人类是生态系统的调控者

人类社会发展，要求人们从生态系统获取更多的物质。在自然生态系统难以满足不断增长的需要时，人们就应用自身掌握的手段去改变自然生态系统，建立各种类型的、为生产和生活服务的人工生态系统。

农业生态系统是人们获取最基本生活资料的人工生态系统。全世界每年从该系统获得的农畜产品数量是巨大的，而且还在不断增加。如果说农业生态系统在很大程度上依靠自然生态系统自身所处的条件，那么城市生态系统可以说完全是以人工化的设施和大量的物质和能量的输入推动系统的运转。

目前，全世界的城市所占的土地面积大约为总面积的 15%，而居住的人口已接近总人口的一半，预计很快将会超过一半。为了保证城市生态系统的正常运行，每个城市都是一个巨大的物质和能量流动枢纽。为了实现对人工生态系统的调控，为了满足人类各种生产和生活需要，经采矿及工程活动每年移动的土壤、岩石和矿物的数量达 1 万~2 万 km^3。人类活动每年释放到大气中的二氧化碳已达 200 多亿吨，使大气中二氧化碳浓度不断增大。成千上万的人工合成的化合物不断加入生态系统的物质循环。所有这些都极大地影响并改变着地球的生物地球化学循环，使原有的生态系统结构发生着愈来愈深刻的变化，这些变化是任何一类其他生物的活动都无法相比的，所以说，今天的“环境问题”是人类活动的结果。

第二节　生态系统的能量流动

生命活动离不开能量，一旦能量转化过程中断，生命也就会停止。能量贮存于物质的化学键中，物质由一种化合物转变成另一种化合物时，贮存于其中的能量也随之转化。能量在生态系统中的传递和转化过程称为生态系统的能量流动。

生态系统的能量流动也遵循热力学第一定律和第二定律。热力学第一定律也称能量守恒定律，该定律认为在自然界发生的一切现象中，能量既不能消灭也不能凭空产生，只能由一种形式转变为另一种形式。如热能转化为机械能，以电磁波形式传递的太阳辐射能，经植物的光合作用转化为贮存于有机物质中的化学键中的化学潜能。热力

学第二定律是关于能量传递方向和转换效率的规律，即自然界的一切自然过程均伴随着能量的传递和转化，在此过程中，除一部分继续传递和作用外，另一部分将以热的形式散失。所谓自发过程就是指不借助外界能量的输入而能自发产生的过程。如热水逐渐变凉，高处的水流向低处，相反现象是不可能产生的。

一、生态系统能量流动的基本途径

太阳是一个高温热源，它可以不断地向地球生态系统输送能量，没有太阳能的输入就不可能有光合作用合成有机物质，也不可能有其他进一步的转化。所以，生态系统内许多过程的进行，最根本的是因为有太阳能的输入和转化。

进入大气层的太阳能大约每分钟为 8.1 J/cm^2，其中大部分被反射回太空和被大气所吸收，约有 46%左右到达地面，但真正辐射到绿色植物上被利用的，也只有辐射到地面上的 1%左右。绿色植物光合作用所积累的能量是生态系统最初的能量积累，所以，常将绿色植物的生产称为初级生产(primary production)，或第一性生产(first production)，绿色植物是初级生产者(primary producer)，它们积累能量的速度称为初级生产力(primary productive force)。存在于生态系统内的活生物的数量叫做生物量(biomass)，生物量可用单位面积上的个体数目(密度)来表示，也可以用生物的重量(常用干重)或所含的能量来表示。

初级生产者所制造的有机物再供给各级消费者，形成生物之间以食物营养为中心的链锁关系，称为食物链(food chain)。初级生产者以外的这些生物利用初级生产的有机物质进行同化作用，实现自身的生长、繁殖和营养物质的贮存，这类生产统称为次级生产(secondary production)。除初级生产者以外的这些异养生物，也就统称为次级生产者(secondary producer)。

次级生产者在转化初级产品过程中，不能将全部的能量转化为新的次级产品，次级产品生产者只能利用初级产品中的一部分，大部分以粪便形式排出，消化吸收的部分中，还有一部分被生命活动消耗，只有那些供个体增长和繁殖新个体的能量，才是转化为次级产品的能量(图 2-7)。

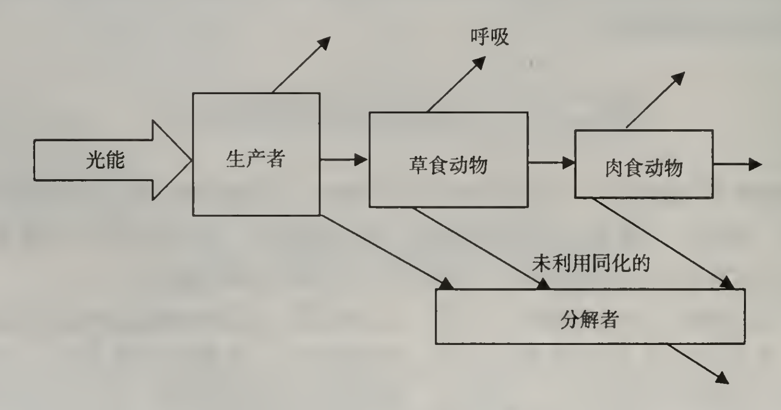


图 2-7　生态系统能流示意图

生态系统中不同生物之间由一系列的捕食与被捕食的关系所构成的食物链，按其性质基本上可归为如下几种：

草牧链：以植物为基础，以活的有机体为营养源，通过绿色植物、草食动物、食肉动物组成为食物链。如草—兔—狐狸。

腐解链：以死的有机体或生物排泄物为营养源，通过腐烂、分解有机物还原为无机物的食物链。如植物残茬—蚯蚓—菌类。

寄生链：它是由寄生生物吸取活的寄主生物体液获得营养而形成的食物链。如螟虫—赤眼蜂，大豆—大豆菟丝子等。

生态系统中的食物链不是单一存在的，上述几种类型的食物链，在同一个生态系统中几乎是同时存在的，由许多食物链交互在一起形成的复杂的网络结构称为食物网(food web) (图 2-8)，在食物网中，某个食物链的某种生物发生变化时，常常不仅影响自身食物链的变化，而且还会影响到食物网中其他食物链的变化。

食物链是生态系统中能量传递的基本途径。

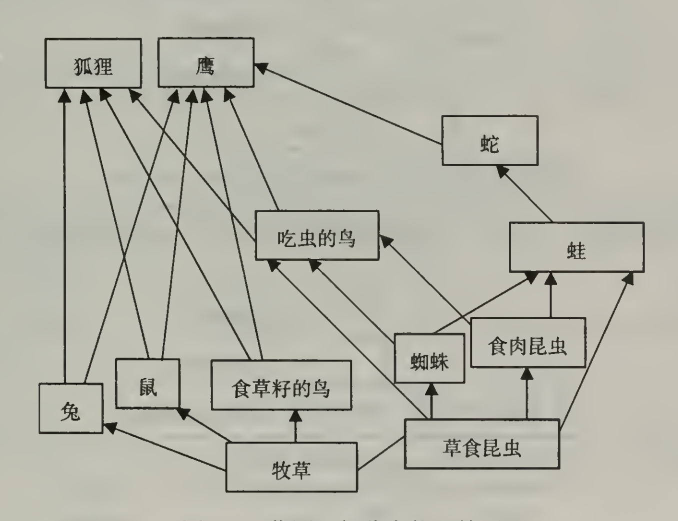
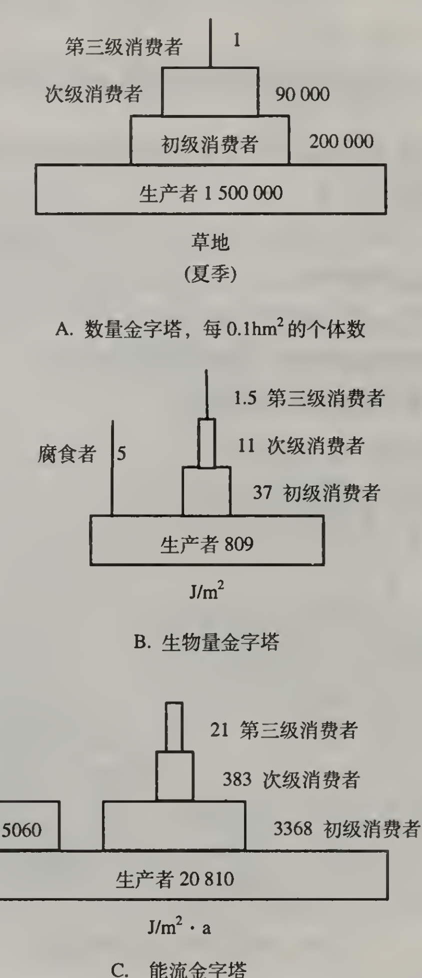


图 2-8　草原上部分食物网简图

二、能量转化效率与生态金字塔

生态系统的能量转化效率是指某一营养级的净生产力与前一营养级的净生产力之比。如前所述，在生态系统中，消费者只能将前一营养级上所固定的能量中的一部分捕获，作为自身的食物，这些食物中也只有一部分转化为消费者身体的成分，或产生新个体。林德曼(Lindeman)对明尼苏达 Celar Bog 湖的能量转化研究发现，上一营养级的能量大约只有 5%~6%转移到下一级营养级上，平均约为 10%左右，称为十分之一定律(law of ten percent)。在食物链中，由于能量由前一营养级转移到下一个营养级都大大减少， 一个食物链的能量变化，若用图形表示出来，类似于金字塔，故称为生态金字塔(ecological pyramid)。除用能量表示(称为能量金字塔，energy pyramid)外，也可以用生物量的多少，或生物个体数目的多少来表示，它们分别称为生物量金字塔(biomass pyramid)和数量金字塔(pyramid of individual number)(图 2-9)。生物的个体数量与生物个

体体积之间并无必然联系，不同生物种的个体体积差异是很大的，如许多体积较小的有机体吃食某个或某些个体大的有机体时，以个体数量表示的金字塔就会呈现倒置的形态，称为倒金字塔。



A. 数量金字塔，每 $0.1hm^2$ 的个体数

B. 生物量金字塔

C. 能流金字塔

图 2-9 能量金字塔

不同的生态系统的能量转化效率不同，净生产力也不一样(表 2-3)。在不同自然生态系统基础上，以不同的农作物种群为主建立的农业生态系统是在改变了自然演替进程的条件下实现的，为了阻止自然演替，就必须进行人工输能，提高土壤肥力，防治有害生物侵袭，提高生产力等。据研究，落叶林的平均初级生产力，每年每平方米为 19 674 200 J，而开发这种森林，使之成为集约化的玉米地(美国)时，净初级生产力总量(包括子粒和营养部分)，随投入的能量和技术装备的增加，由 1945 年的 11 251 968J 增加到 26 602 030J。再如，热带雨林年净初级生产力为 $7.5t/hm^2$，热带稻田一年两季，现在可达 $30t/hm^2$ 以上，在人工调控下，系统净生产力常常可以高于自然生态系统。表 2-4、表 2-5 所列分别是美国几种畜禽饲料和食物转化效率及中国几种作物高产田的平均生长率。

表 2-3 地球上大型生态系统的净第一性生产力

生态系统类型	面积 /$10^6 km^2$	单位面积上的净第一性生产力(干重)		全球净第一性生产力(干重) /$10^9 t$
		生产力范围 /($g/m^2 \cdot a$)	平均值 /($t/hm^2 \cdot a$)	
热带森林	20	1000~5000	20	40.0
温带森林	18	600~3000	13	23.4
北方森林	12	400~2000	8	9.6
稀树灌丛林	7	200~1200	6	4.2
热带稀树草原	15	200~2000	7	10.5
温带草原	9	150~1500	5	4.5
冻原和高山草甸	8	10~400	1.4	1.1
半荒漠	13	10~250	0.7	1.3
石质荒漠	20	0~10	0.03	0.07
耕地	14	100~4000	6.5	9.1
湖泊及河流	2	100~1500	5	1.0
沼泽	2	800~4000	20	4.0
大海	332	2~400	1.25	41.5
大陆架	27	200~600	3.5	9.5
潮汐带及河口区	2		20	4.0
全球总和	510	500~4000	117.38	164.0

表 2-4 美国主要家畜、家禽的饲料转化效率

种类	每消耗 100kg 饲料增重 /kg	屠宰率 /%	每消耗 100kg 饲料产肉 /kg	每焦耳饲料能所生产的食物能 /J
鸡	50	72	36	0.12
猪	28	70	19.6	0.20
牛	12	56	0.7	0.06

表 2-5 中国几种作物高产田的平均生长率

作物种类	地　点	收获量 /(kg/hm^2)	生物量 /(kg/hm^2)	平均生长率 /($g/m^2 \cdot d$)
水稻(一季稻)	江苏邳县	12 832.5	25 162.5	16.22
水稻(早稻)	湖北武昌	7665	17 250	14.37
冬小麦	江苏农业科学研究院	8235.0	21 187.5	9.85
春小麦	青海香日德农场	15 195.8	30 391.5	21.7
玉米	吉林	16 695	41 737.5	29.8
高粱	河北	12 826.5	36 646.5	27.1
甘薯	广东海丰	12 570	39 843.8	13.28
甘薯	山东	6950.3	21 718.5	12.06

第三节　生态系统的物质循环

生物的生命过程就是不断地同周围环境进行新陈代谢的过程，是一种物质运动过程。物质是生物有机体生命活动所进行的生物化学过程的结构基础，所以，没有物质，没有物质的运动，生命就将停止。同时，物质又是能量的载体，没物质能量也将自由散

失。

构成生命成分的主要元素约 40 种，如碳、氢、氧、氮、磷、钾、铜、锌、硼等，是保证生命活动正常进行所必需的，它们从地球的大气圈、水圈和土壤岩石中获取。这些物质由生物生活的周围环境中进入生物体，在生态系统的食物链中不断传递，或经分解再返回自然环境，然后被生物再次吸收，组成生态系统复杂的物质循环。

一、生物地球化学循环

环境中各种元素沿着特定的路线运动，由周围环境进入生物体，最后回到环境中，各种元素运动路线所包含着的活有机体的有机阶段和由各元素基本化学性质所决定的、无生命的阶段所组成的循环运动过程，称为生物地球化学循环(geo-biological-chemical circulation)。

各种元素在生态系统的生物与非生物环境要素之中暂时滞留、贮存的场所称为库(pool)，在库与库之间的转移构成物质循环(material circulation)，也叫做物流(material flow)。根据物质循环路线和周期长短的不同，可将物质循环分为生物小循环(biological circulation)和地球化学大循环(geo-chemical circulation)。

(一) 生物小循环

这种循环是指环境中的元素由生物体吸收后，在不同生物间被相继利用，相互传递，最后经分解者的作用归还于环境，而再度被利用。这是在生态系统内，以生物为主体与周围环境之间进行的物质交流和循环，这类循环的范围小，循环的时间较短。特定的生态系统与该系统的环境之间，存在着一定的物质的输入与输出，所以，生态系统的物质循环一般都是开放的循环。

(二) 地球化学大循环

这种循环又称地质大循环(geological circulation)，是指环境中的元素经生物吸收进入有机体，然后以排泄物和残体等形式返回环境，进入大气圈、水圈、土壤岩石圈及生物圈的循环。形成这种循环的动力包括地质、生物和气候三种。地质动力主要是地壳运动和火山喷发，将各种元素移至地表层，以岩石风化分解参与系统的交换过程。因风、雨等使各种元素移至海洋及土壤深层，或将元素带到土壤中来。生物的活动和迁移也可以使元素发生转移。地球化学循环具有全球性质，循环过程的时间长，范围大，与生物小循环相比，其影响更深远。

生物地球化学循环是地球上物质运动的一种形式，物质从环境到生物再回到周围环境，周而复始。物质循环与能量流动是不可分割地联系在一起的，但是能量的流动是单向的。

生物圈的物质循环，根据流经的途径不同可分为气态循环和沉积型循环。物质以大气圈和水圈为主要贮存库，其元素或化合物可以转化为气体形态，如碳、氧、水等，经

大气进行扩散，循环比较迅速，有全球性特点，这类循环称为气态型循环(atmospheric circulation)。另一些物质，如磷、铁等，以土壤岩石圈为主要贮存库，经风化、人类开采而进入生物体，然后再返回环境。其中一部分可存留于土壤中被再利用；另一部分则经沉积和成岩作用变成岩石，只有再次经风化等作用后才可能重新进入循环，循环较为缓慢，这类循环称为沉积循环(sedimentary circulation)。

二、水 循 环

水是生物圈极为重要的物质，是生命过程的介质，光合作用的重要原料，是多种矿物元素和气体的溶剂和运转的介质。地球上有近 15 亿 km^3 的水，它以固、液、气三种形态存在。水的主要贮存库是海洋，海洋中的水约占总量的 94%。陆地上的水只占总水量的 6%，其中 1/3 以固态形式存在，分布于冰川、冰帽，其余大部分为地下水。大气中的水只占总水量的 0.01%(表 2-6、表 2-7)。三种形态的水是可以相互转化的，其中以气态水最活跃。由于水具有可以流动、能溶解其他多种物质、贮存的能容易转换等特有的理化特性，它的循环对生态系统各要素都有重大影响，是生物地球化学循环得以实现的关键因素。

表 2-6　全球水的估计贮量(单位：10^3km^3)

水资源	体积	占总量的比例%
地球总水量	1 460 000	
海洋	1 370 000	93.84
地下水(至 5km 深)	60 000	4.11
(其中浅层地下水)	(40 000)	(2.74)
湖水	750	0.05
冰川和永久积雪	29 000	1.99
土壤水和渗流水	65	0.005
大气水	14	0.001
河水	1.2	0.0001

表 2-7　全球淡水及各种存在形式的比例

存在形式	占总量的比例 /%	存在形式	占总量的比例 /%
极地、冰盖、冰川、冰山	77.23	江河淡水	0.003
至 800m 深的地下水	9.86	矿物中含水	0.001
地下 800m 至 4000m 深的地下水	12.35	植物、动物及人体中含水	0.003
土壤水	0.17	大气中含水	0.04
淡水湖泊	0.35	合计	100

水在生物圈的循环是通过蒸发、蒸腾和降水等来实现的。其推动力是太阳能与重力的结合。水的循环按其途径可分为全球性大循环和陆地水分小循环与海洋水分小循环(图 2-10)。水循环可以视为从水域开始至返回水域而止的转变过程。海洋是水的最大贮存库，海水经太阳辐射蒸发为气态，随大气环流运动，其中一部分在海域上空凝聚成云，以降水形式返回海洋，构成海洋水小循环(ocean water circulation)。另一部分经环流移至陆地上空，以雨、雪、雾等形式降至地表，然后，经地表径流或地下径流而回归大海，从而构成由海洋—空间—陆地—海洋的水分大循环(ocean-space-continent-ocean water circulation)。降至地表的水，一部分经蒸发返回大气中，另一部分渗入土壤后被植物吸收，有的被同化为有机物质，有的则经植物的蒸腾作用散失到大气中。进入大气的水，在一定条件下又以降水形式返回地面，这种在陆地范围内，有生物参与的水分循环为陆地水小循环(continent water circulation) 。水分经不停的循环运动保持相对的动态平衡。生物圈范围内平均每年的蒸发量与降水量分别为 1000mm，但海洋的平均蒸发量和降水量分别为 1240mm 和 1140mm，蒸发量大于降水量。陆地年平均降水量和蒸发量分别为 710mm 和 470mm，每年由河流排出 240mm，弥补了海洋蒸发的亏损。

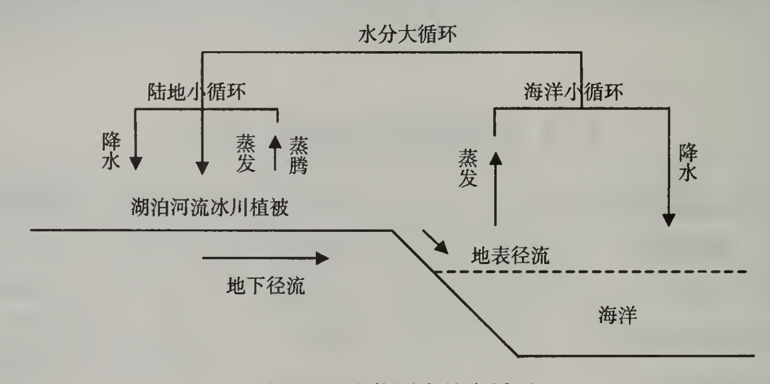


图 2-10　生物圈中的水循环

水循环是气态型循环中最基本的物质循环，对生物圈的物质循环具有非常重要的意义。在循环过程中，水经过各贮存库的周期长短是不一样的。如冰川水的周转期约 8600 年，地下水为 5000 年，河水约为 11.4 天，植物体的周转期更短，只有几天时间，如夏天约 2~3 天。

森林在水循环中具有特别重要的作用，森林的植物从地下吸取水分，经传导叶片蒸发到大气中，可以调节大气的湿度，降低林区空气温度。降水时，森林树冠一般可以截留约 20%~30%，对减少地表径流和水土流失有很大作用。所以，森林是水循环重要调节者。

三、气 态 循 环

气态循环(atmospheric cycle)的主要贮库是大气圈，其次是水圈。参加这类循环的元素相对地具有扩散性强、流动性大和容易混合的特点。所以循环的周期较短，很少出现元素的过分聚集和短缺现象，具有明显的全球循环性质和比较完善的循环系统。属于气

体循环的物质主要有(碳、氢、氧、氮)等。

(一) 碳　循　环

碳是构成有机物质的基本成分。地球上碳的总量是巨大的，约有 26×10^{15}t。其有多种存在形式，绝大部分以无机态存在于岩石圈中，有机态碳只占 0.05%，多呈化石态(煤、石油等)埋藏于岩石圈中。生物只能利用以气体形态存在于大气中的二氧化碳(含碳约 700×10^{9}t)，或溶解于水中的二氧化碳(含碳约 35×10^{12}t)，经过海洋生物实现生物与环境之间的碳交换。陆地上的绿色植物吸收大气中的二氧化碳，经光合作用合成有机物质，然后， 在植物的呼吸作用中和其他消费者和分解者的生命活动过程中又逐渐返回大气，进入再循环。海洋中的浮游植物同化海水中的二氧化碳以后，也经过与陆地相似的途径再回到环境中。但是，不管是陆地，还是海洋中合成的有机物质中的碳，有一部分可能以化石有机化合物(如煤)的形态存在于地下，这一部分就将在循环途中停滞下来，只有当这些化石有机物质被开采利用时，才又进入新的循环，海水中二氧化碳浓度增高时，以碳酸钙的形式沉积于水下，也使碳的循环出现停滞(全世界的碳酸钙储量约为 20×10^{15}t)。这些碳酸钙经地质运动露出地表，经雨水溶解、物根系作用等又使这些碳进入再循环(图 2-11)。

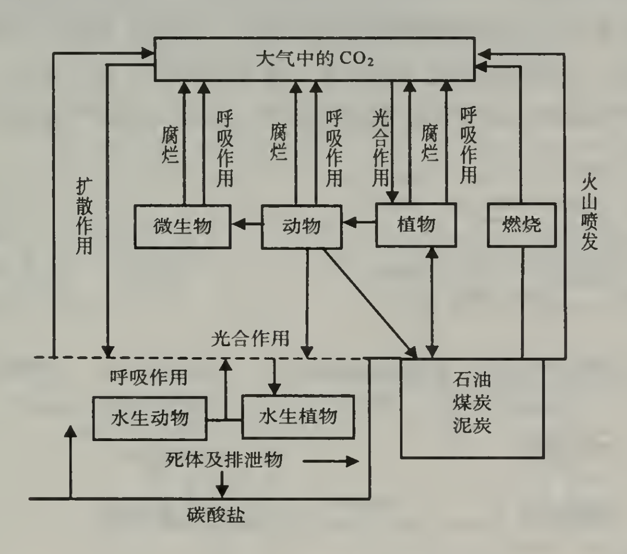


图 2-11　生物圈中碳循环图

人类的生活和工农业生产活动大量地消费化石燃料等，使二氧化碳排放量大幅度增加。大气中二氧化碳含量已从1 9 世纪中叶的 260~280μg/g 增加到 1978 年的 330μg/g，现在增加的速度更快。大气中二氧化碳浓度增加可能会带来为温室效应(greenhouse effect)，这是生态学家目前研究的热点问题之一。

(二) 氮 循 环

氮是氨基酸、蛋白质的重要成分，是构成生物有机体的重要元素之一。氮主要贮存于大气中，约占大气总体积的 79%，总量约 38×10^6 亿 t。大气中的氮是一种惰性气体，大多数植物不能直接利用，只有经固氮细菌等生物固氮，闪电、宇宙射线、火山等造成的高温及光化学固氮或者经工业固氮，转变成氨态或硝态氮以后，才能被植物吸收利用，土壤中的氮主要存在于腐殖质中，其中 98%是有机态氮。海洋中的氮含量也只有百万分之几。

自然界的氮循环中，生物固氮占有十分重要的地位。有固氮能力的生物很多，其中与豆科植物共生的固氮菌每年大约可固氮 1400 万 t，据 Hutchinson 估计，陆地上的固氮率至少为 $1g/(m^2\cdot a)$以上；海洋固氮率比陆地上要低得多，但总量仍是可观的。生物圈每年的固氮总量约 5400 万 t。此外，经闪电、宇宙射线等的固氮量估计每年也可达 760 万 t，并可经降水过程进入土壤。人类运用工业固氮的数量，目前超过1 亿 t。人类已极大地参与了自然界的氮循环过程。生态系统中的植物吸收利用土壤中的氮素，与植物体中的含碳化合物结合成为氨基酸、蛋白质，并同其他化合物一起组合成为植物有机体，然后，作为动物饲料再进入动物有机体。植物和动物死体及排泄物中的含氮有机物，经微生物的分解成为二氧化碳、水和氨气返回到环境中，再次被利用而进入新一次循环过程。生态系统中的氮可以因有机物的燃烧挥发损失；或经土壤微生物的反硝化作用变为游离氮损失；此外，土壤中的氮还可因降水、灌溉等淋溶入地下水中，一部分随江河水流入海洋，其中的部分加入海洋的生物循环过程，另有一些则可能沉积于海底的沉积物中(图 2-12)。

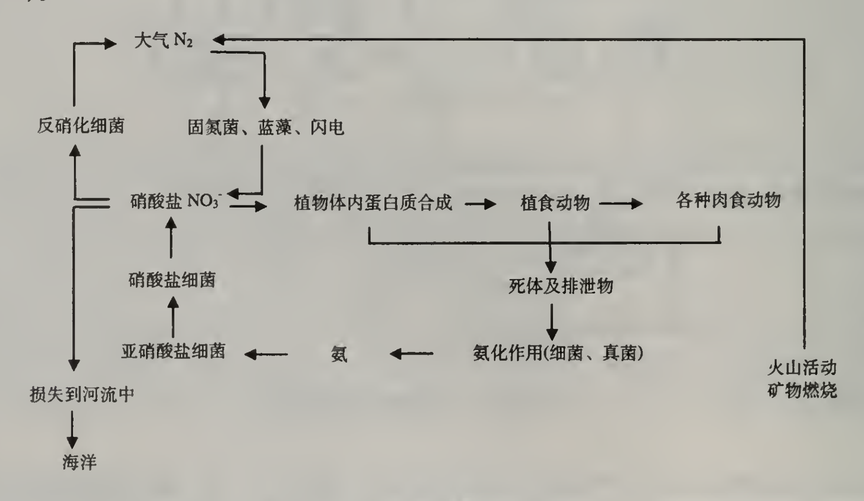


图 2-12 生物圈中氮的循环途径

四、沉 积 循 环

沉积循环(sedimentary cycle)的蓄库主要是岩石圈和土壤圈。属于沉积型循环的营养元素主要有磷、硫、钾、钠、钙等。保存在岩石圈中的这些元素只有当地壳抬升变为陆

地后，才有可能因岩石风化、侵蚀和人工采矿等形式释放出来被生产者植物所利用。因此，循环周期很长，常常还会造成局部性的匮乏。

(一) 磷 循 环

磷也是构成生物有机体的必需元素，是生物中去氧核糖核酸的重要组成成分。在生物的光合作用过程中光合磷酸化和碳循环过程都需要磷的参与，磷是能量传递及贮存的重要物质腺苷三磷酸(ATP)的组成成分，是生物体内能量转化不可缺少的元素，因此，也是生态系统中能量转化所不可缺少的。

磷的主要贮存库是岩石圈。磷酸盐岩石被风化和侵蚀后，成为可溶性的无机磷酸盐，随水的流动进入土壤圈和水圈，被植物吸收进入植物体。含磷有机物一部分经植株残体、秸秆归还土壤圈、岩石圈。土壤中各种含磷有机物经微生物分解，再次成为可溶性磷酸盐，又可供吸收利用。陆地生态系统中的部分磷经流水冲刷进入江河、湖泊和海洋，经水生生物吸收利用后，可在水生生态系统食物链中传递。水生生物的排泄物、残体也可经分解再次被利用。在水域和陆地的磷都可以独立构成陆地或水域的生物小循环。水域中的磷除小部分为生物利用外，另有一部分可经海鸟的粪便、捕食、贝类等返回陆地，大部分磷以钙盐的形式经海洋的沉降和成岩作用，沉积于海底成为岩石，这部分磷将在一个较长的时期内脱离循环运动过程(图 2-13)。

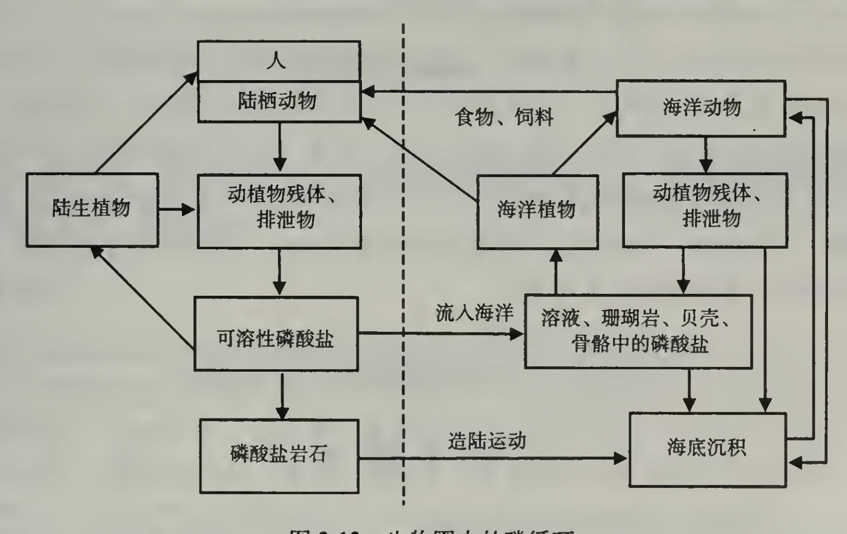


图 2-13 生物圈中的磷循环

(二) 硫 循 环

硫在生物圈中主要以硫化氢(H_2S)、二氧化硫(SO_2)和硫酸根离子(SO_4^{2-})参与循环。岩石圈中的有机、无机沉积物中的硫，经风化和分解而释放，以盐溶液的形式进入陆地和水体。另外一部分硫以气态形式参与循环，硫进入大气是以硫化氢或二氧化硫形式，其

途径主要有化石燃料燃烧、火山爆发、含硫有机物质分解及海面散发等。硫化氢能较快地氧化生成二氧化硫，并在水中形成硫酸或亚硫酸，进入土壤后硫酸根离子可被植物吸收利用， 组成氨基酸的成分，并经食物链转移。生物残体和排泄物经微生物分解形成的可溶性硫酸盐又可再次被植物利用。氧化态的硫在化学或生物作用下，转变成还原态的硫，反之， 也可以实现相反转化。海洋中的硫可以有机或无机化合物的形态沉积于海底而暂时停止循环运动。硫循环既属沉积型循环，也属气态型循环(图 2-14)。

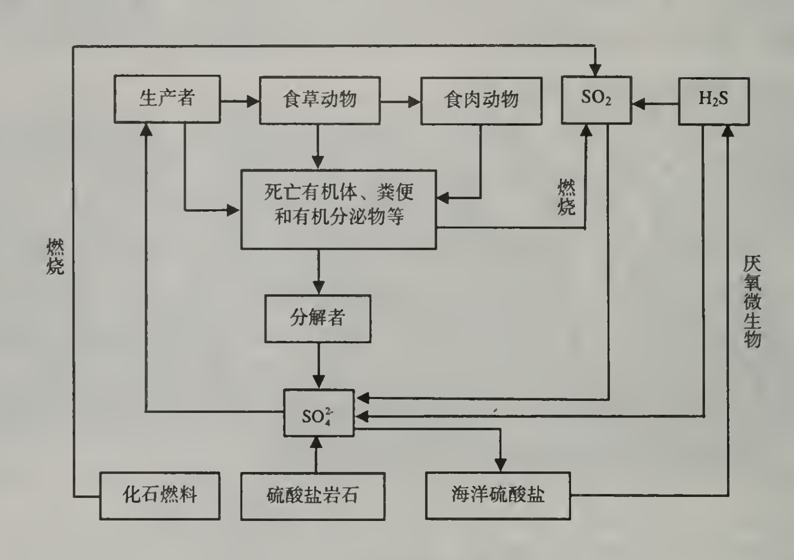


图 2-14　生物圈中的硫循环

人类对硫循环影响很大，化石燃料燃烧每年向大气中排放大量二氧化硫，并与空气中的水结合形成硫酸。硫酸对人的危害很大，只要有百万分之几的浓度就会对人的呼吸道产生刺激，引起咳嗽、气喘等。二氧化硫污染重的地区，雨水中因含硫酸多，形成酸雨，对工农业生产都将造成巨大危害。

第四节　生态系统的信息传递

一、信 息 概 述

生态系统中各种成分间有着广泛的联系，这种联系依靠的是生态系统中的信息(information)和信息传递(information transformation)。信息传递是生态系统的重要功能之一，它在维持生态系统平衡，促进系统进化与发育，调节、控制系统内物流和能流等方面起重要的作用。在生态系统中充满着各种各样的信息，信息传递是指信息在生态系统中沿着一定的途径由一事物传递给另一事物的过程。可以说生态系统既是创造信息的信源，也是传递和接受信息的信宿，时刻存在着信息流动，同时也是一个由多种信源、信道、信宿共同组成的多层次、多渠道、复杂的信息系统。

二、生态系统中的信息类型

生态系统中的信息多种多样，它是在某种作用下，物体所显示出的种种状态。因信息产生机制、形式、作用不同，可将信息分为物理信息、化学信息、营养信息和行为信息。

1. 物理信息

所谓物理信息指由物理因素引起的生物之间或生物与非生物之间的相互作用所产生的信息，其特点是存在范围广，作用大，直观而易捕获。光、声音、温度、湿度和颜色等均属于生态系统的物理信息。这些信息有两种作用，其一是起着组分内与组分间及各种行为的调节作用，如鸟类的鸣叫，青蛙的鸣叫，蝴蝶的飞舞，花的颜色，某些动物的颜色和形态等都有吸引异性、种间识别、威吓和警告等作用；其二是起着限制生命有机体行为的作用，例如，光强度、温度、湿度、日照等物理信息都对生态系统中生物生存或试图生存施加信息和影响。温湿程度的信息可以给生产者和消费者传来某些行为限制，预示生存的适应度和某些生理过程的效率。

光信息是生态系统物质生产的必需条件之一，也是外界输入系统的一种信息。生态系统中的生物在漫长的进化过程中，形成了与其生存环境相适应的光周期特性，从而直接控制着自身的生长、发育和繁殖。无疑，在生产实践中可以利用光信息作用来调节控制生物的生长、发育和演变过程，以达到我们的预期目的。例如，利用各种植物的光周期特性和收获经济器官的不同，通过人工控制光周期达到高产早熟及延长或提早花卉植物的开花期，以便提高其观赏价值和商品价值。在育种上利用光照处理调节不同光周期植物，使其在同一时期开花进行杂交，培育优良品种。养鸡在保证营养供应基础上，可以通过控制光照时间提高鸡的产蛋率。另外，声、磁、光辐射在生态系统管理中都可以被利用。例如，用一定频率的声波、磁场、光辐射处理谷物、蔬菜作物及树木等种子，可提高其发芽率，获得高产。

2. 化学信息

化学信息就是生物化学代谢产生的某些化学物质，它通过分子作用而引起的信息传递作用，在生物的生理代谢、行为支配上有着十分重要的意义。能起到信息作用的化学物质种类很多，如维生素、抗生素、激素等；目前已知结构的物质多为次生代谢物，约有 3 万余种，主要是生物碱、萜类、黄酮类、非蛋白质有毒氨基酸及各种甙类、芳香族化合物等。次生代谢物在植物和草食动物之间的信息传递表现为威慑作用、吸引作用和激素作用等。在生态系统中，生物行为常常是在某种化学物质的引诱和刺激下进行的，如昆虫之间都存在着相互联系的方式，以保证它们有秩序地集体行动和抵抗外敌。这种信息化学物质在昆虫学上称为信息素，昆虫的信息素种类最多，有报警、集合、搜索食物和性信息素等。在生产中有人采用性外激素或者人工合成的性激素，诱杀害虫或阻止害虫的繁殖获得良好的效果；也有利用装有性激素的诱捕器来捕获害虫，预测、预报短期害虫发生的时期和范围，为预防害虫大面积发生提供依据。

3. 营养信息

营养信息是由外界营养物质数量的变化而导致生理代谢变化产生的一类信息，这类信息通过食物链传递或生物体营养状况及生物种群繁殖等表现出来。营养信息在生物体内的传递或生物个体之间、种群之间的传递过程中直接影响着生物的生长、发育、繁殖及迁聚，具有一定的调控作用。例如，禽类动物长期饲用缺钙食物后，会因缺钙而导致卵壳软化、孵化率下降、减少种群繁殖等。在果树管理上，常采用环割技术来调节果树体内的营养分布，阻止营养物质的下移，可以促进果树花芽的形成，提高产量。生态学家们发现，草地生态系统的捕食者对被捕食者生产力和种群密度及结构有调节作用，这主要是通过捕食技巧来实现的。而捕食技巧来自于被捕食者的营养信息，这种营养信息告诉捕食者怎样才能以最小的代价换取最大量的捕食食物，并且始终维持捕食者和被捕食者种群的平衡。

4. 行为信息

所谓行为信息是生态系统中各种生物，尤其是动物以某种特殊行为表现出的一类信息，这类信息产生机制复杂多变，形式多样，因不同种群而各具特色。其传递方式也因生物种类的不同而多种多样，有的以化学信息传递，有的以物理信息传递，如当某农田出现大量田鼠时会引诱大量猫头鹰群聚于此地，获得丰厚的食物；当田鼠数量减少直至不能满足猫头鹰的消费时，猫头鹰又离去找新的食物源。同一动物种群，两个个体相遇时，也表现出有趣的行为信息，可能是识别、威吓或挑战的信号。

三、生态系统中信息传递途径

各种不同类型生态系统有千差万别的信息。概括出一个信息传递途径的普遍性模型是必要的。信息传递过程实际上就是通讯的含义。通讯就是要使接收者获得与发送端尽可能相同的消息内容和特征。生态系统任何信息流的实质性过程都离不开如图 2-15 所示的传递模型。该模型可以分为信源、发送器官、信道、接收器官、信宿等 5 个主要部分。

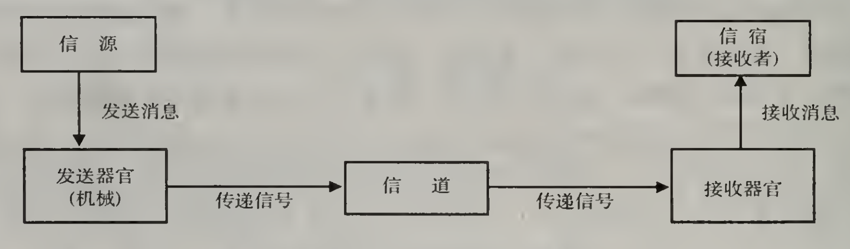


图 2-15 信息传递途径模型

1) 信源。称为信息源，它产生要传输的信号。

2) 发送器官(或机械)。它要把传递的信息变换成为适合于信道上传输的信号。一般由编码器按照信道类型进行编码。

3）信道。这是连接发送端与接收端的信息媒介。传递的信号通过此媒介从一个有机体到另一个有机体；从这一种群到另一种群；从一个群落进入另一个群落。空气、水域、导线和光纤维等都是一些典型的信道。一个信息的传递有时仅通过一种信道，而有时要经过多种信道。

4）接收器官。执行与发送器官(或机械)相反的功能，把通过信道后的信号接收，或再加以变换成能被接收者所理解的消息或信号。

5）信宿(接收者)。即为收到信息者，是信息传递的目的地。信息传递的目的就是要使接受端获得一个与发送端相同的复现消息，包括全部内容和特征。然而，在实际中不可避免地会产生噪声的干扰。所以，接收信息和发送信息之间总会有差别，信息传递的过程中会失真，如无线电接收中的静电干扰、雨雪对电视信号的干扰、发射机的热干扰等等。在环境中所有远近不同、方向不同、自身或周围的干扰等，统称为环境噪声。噪声是生态系统中所有信息传递的限制性因素。

第五节　生态系统一般规律及生态平衡

一、生态系统一般规律

生态系统的一般规律，是生态平衡的理论基础，也是应用生态学的理论基础，是解决人类当前面临的人口、粮食、能源、资源、环境等五大问题的基础。

1. 生物与环境相互作用规律

生态系统中生物与环境是相互作用、相互影响、相互依存的有机整体，生物依赖于环境，就是环境塑造着生物，而生物的生长发育也改变着环境，改变了的环境又反作用于生物，这就是生物与环境间的生态关系。

2. 生态因子综合作用规律

生态系统中各种生态因子(ecological factor)都是同时存在同时起作用，它们彼此联系、互相促进、互相制约，任何一个因子的变化都会引起其他因子的变化，因此，生态因子对生物的作用是综合作用，生态因子的生态作用有直接作用(direct action)和间接作用(indirect action)之分，作用的大小与生物的发育阶段有关系，因此其有阶段性特征。在生态系统中有多个生态因子共同作用于生物体，但在某一阶段有一起决定性作用的因子，叫做主导因子(leading factor)或者叫主要因子，主要因子和次要因子可以相互转化。生态因子之间不可相互替代，但可以相互补偿。

3. 生物间相互依存与相互制约规律

相互依存与相互制约，反映了生物间的协调关系，是构成生物群落的基础。具有相同或不同的生理、生态特性的生物，占据了各自相适宜的生态位，构成生物群落或生态系统。系统中不仅同种生物相互依存、相互制约，异种生物间、不同群落或系统之间，也存在相互依存与制约的关系，也可以说彼此影响。这种影响有些是直接的，有

些是间接的，有些是立即表现出来的，有些需滞后一段时间才显现出来。简言之，生物间的相互依存与制约关系，无论在动物、植物和微生物中，或在它们之间，都是普遍存在的。这种关系的具体表现是通过食物链与食物网实现的，即每一种生物在食物链网中，都占据一定的位置，并具有特定的作用。各生物种之间相互依赖、彼此制约、协同进化。被食者为捕食者提供生存条件，同时又为捕食者控制；反过来，捕食者又受制于被食者，彼此相生相克，使整个体系成为协调的整体。生物体间的这种相生相克作用，使生物保持数量上的相对稳定，这是生态平衡的一个重要方面。

4. 物质循环与再生规律

生态系统中，植物、动物、微生物体借助能量的不断流动，一方面不断地从自然界摄取物质并合成新物质，另一方面死有机体又随时被分解为原来的简单物质，即所谓的“再生”，重新被植物所吸收，进行着不停顿的物质循环，因此要严格防止有毒物质进入生态系统，以免有毒物质经过多次循环后富集到危及人类的程度。至于流经自然生态系统中的能量，通常只能通过系统一次，它沿食物链转移时，每经过一个营养级，就有大部分能量转化为热散失掉，无法加以回收利用。因此，为了充分利用能量，必须设计出能量利用率较高的生态系统。如对于城市垃圾的处理，从最初的填埋法到后来的焚化法，再进一步到堆肥制取沼气法，便体现了人类逐步掌握生态学的循环与再生规律，并应用于实践的过程。

5. 物质输入输出的动态平衡规律

物质输入输出的平衡规律，又称生态系统协调稳定规律，涉及系统中生物与环境两个方面。当一个自然生态系统不受人类活动干扰时，生物与环境之间的输入与输出，是相互对立的关系，生物体进行输入时，环境必然进行输出，反之亦然。

生物体一方面从周围环境摄取物质，另一方面又向环境排放物质，以补偿环境的损失，也就是说，对于一个稳定生态系统，无论对生物，对环境，还是对整个生态系统， 物质的输入与输出总是相平衡的。当输入不足时，会产生生态匮乏，例如一个城市物资供应不足，必然造成生产生活紧张，效率下降，反之，当城市物资供应足但输出不足， 又会导致生态滞留，使环境恶化，生产生活同样受阻。

6. 生物种协同进化规律

生物与生物，以及生物与环境之间，存在着作用与反作用的过程。例如捕食者与猎物之间，经过长期的相互适应与协同进化，使捕食者通常具有锐利的爪、撕裂用的牙、毒腺或其他武器，以提高捕食效率；相反，猎物常具有保护色、警戒色、假死、拟态等适应特征，以逃避被捕食。在这一相互适应协同进化过程中，常常是使有害的“负作用”倾向于减弱。捕食者往往首先捕杀猎物中受伤的、病残的、年老体弱的，这实际上为猎物提高种群质量创造了条件，这就使得捕食者和被捕食者种群都得以生存和发展。

7. 环境资源的有效极限规律

任何生态系统中作为生物生存的各种环境资源，在质量、数量、空间和时间等方

面，都有其一定的限度，不能无限制的供给，因而生物生产力通常都有一个大致的上限。也因此，每一个生态系统对任何外来干扰都有一定的忍耐极限。所以，采伐森林、捕鱼狩猎等不应超过能使资源永续利用的产量；保护某一物种时，必须使它要有足够的生存、繁殖空间；排污时，须使排污量不超过环境的自净能力等。

二、生态平衡机制

生态平衡(ecological equilibrium)也称生态系统的平衡(ecosystem balance)，是指生态系统通过发育和调节所达到的一种稳定状态。当生态系统处于这种相对稳定状态时，生物之间和生物与环境之间出现高度的相互适应，种群结构和数量比例持久地没有明显的变化，生产与消费和分解之间，即能量和物质的输入与输出之间接近平衡，因为能量流动和物质循环总在不间断地进行，生物个体也在不断地进行更新。

在自然条件下，只要给以足够的时间，外部环境又保持相对稳定，生态系统总是按照一定规律朝着种类多样化、结构复杂化和功能完善化的方向发展，直到使生态系统达到成熟的最稳定状态为止。

在生态系统发展早期阶段，系统的生物种类成分少，结构简单，食物链网单一，对外界干扰反应敏感，抵御能力小，所以是比较脆弱而不稳定的。当生态系统逐渐演替进入到成熟时期，生物种类多，食物链网错综，结构复杂，功能效率高，对外界的干扰压力有较强的抵御能力，自我调节和恢复能力较高，因而稳定性强。这是由于系统经过长期演化，通过自然选择和生态适应，各种生物都占有一定的生态位，彼此关系比较协调而依赖紧密，并与非生物环境共同形成结构较为完整，功能比较完善的自然整体，外来生物的侵入比较困难。还由于复杂的食物网链结构使能量和物质通过多种途径进行流动，一个环节或途径发生损伤或中断，可以通过其他方面的调节来抵消或得到缓冲，不致使整个系统受到伤害。所以，自然生态系统的生物种类越多，食物网和营养结构越复杂，便越稳定。

生态系统是一个动态系统，导致其稳定与平衡的上述种种因素也常常发生某些变化。然而，当生态系统达到动态平衡的最稳定状态时，它能够自我调节和维持自己的正常功能，并能在很大程度上克服和消除外来的干扰，保持自身的稳定性。有人把生态系统比喻为“弹簧”，它能忍受一定的外来压力，压力一旦解除就又恢复到稳定状态，这实质上就是生态系统的反馈调节机制。

生态系统中的反馈现象十分复杂，即表现在生物组分与环境之间，也表现于生物各组分之间和结构与功能之间，其中起主要作用的是能够使生态系统达到和保持平衡或稳态的负反馈机制。负反馈就其效果而言，是指生态系统中其他成分的响应变化，抑制和减弱某一导致生态系统最初产生变化的成分的影响作用。例如在草原上，当食草动物兔子的数量增多后，植物就会因受到过度啃食而减少；接着，兔子由于得不到充足的食物，数量自然减少，从而又有利于植物数量的逐渐增多。可见二者互为因果，彼此消长，维持着个体数量的大致平衡(图 2-16)。更复杂一些的情况发生在系统中的多个成分之间(图 2-17)。当生态系统受到外界的干扰和破坏时，只要不过分严重，一般都可通过反馈机制和自我调节的作用使系统得到修复，维持其稳定与平衡。

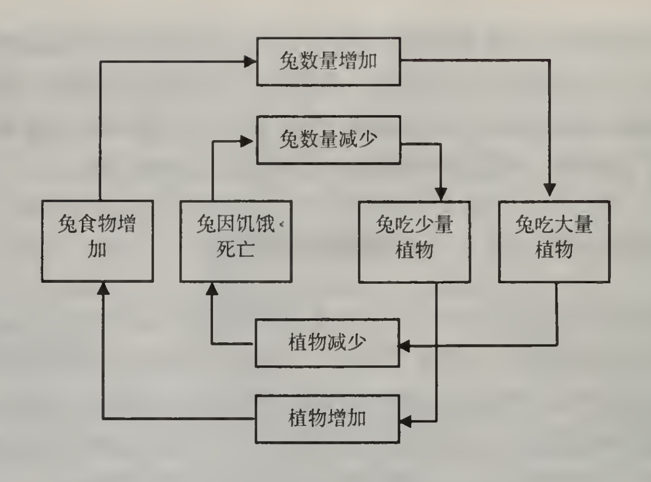


图 2-16　兔与植物种群之间的负反馈环

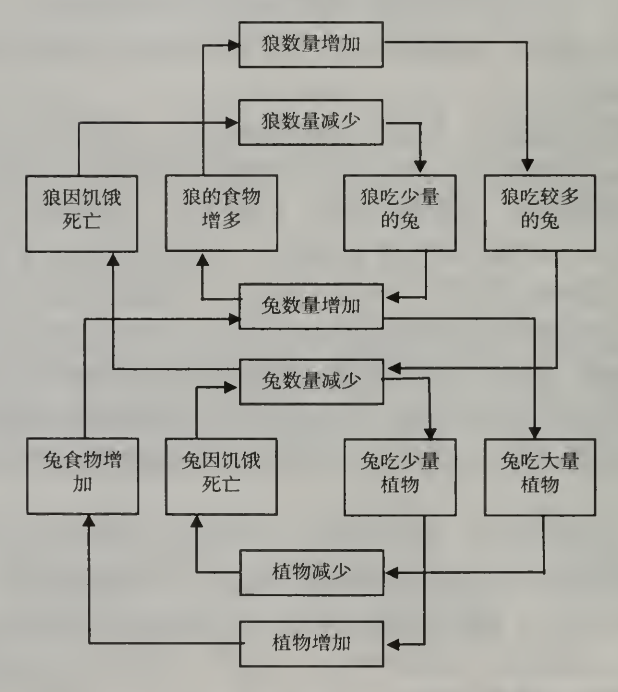


图 2-17　狼、兔、植物种群之间的双重负反馈环

但是，生态系统的自我调节能力是有一定限度的。当外界压力很大，使系统的变化超过了自我调节能力的限度即“生态阈限”(ecological threshold)时，自我调节能力随之下降，以至消失。此时，系统结构被破坏，功能受阻，以至整个系统受到伤害甚至崩溃，即平常所说的生态平衡失调或生态危机(ecological crisis)。

人类由于不了解生态系统的调节机制和稳定性的极限，盲目行动，导致局部地区生态平衡破坏，使人类本身蒙受损失甚至威胁到人类生存的现象不乏其例。例如，城市环境污染、山区水土流失、农田害虫猖獗、干旱土地沙漠化等等。一个生态系统的稳定性受到破坏，不仅使本系统受到伤害，而且通过输出还危及相邻生态系统的稳定和平衡。

因此，人类应当对各种生态系统的结构、功能、调节机制和稳定性极限进行深入研

究，掌握其发展规律，以使能够预测其发展趋势，及早采取措施，防止生态系统向着不良方向发展免受损失。

第六节　生态系统研究的调查取样

在生态系统研究中，收集生物与环境因子的数据是最基本的工作，这一数据收集过程叫做取样(sampling)。由于受人力、物力和时间的限制，在大多数情况下，研究者都不可能对所研究的生态系统进行全部的研究，而只能抽取其中的一部分来研究分析，抽取的部分由一系列小的地段所组成，小地段叫做取样单位(sampling units)。根据形状的不同，取样单位可有不同的名称，比如，样方、样圆、样点、样条、样带等等，为了方便，这里将取样单位统称为样方(quadrat)。

一、取 样 方 法

取样是生态学研究的重要步骤，研究结果的好坏与取样方法有着较为密切的关系。取样方法有两大类型：一是主观取样，二是客观取样；前者是人为地选择取样地段，后者是通过某种统计学方法来设置样方，又叫做概率取样法。

1. 主观取样

选代表性样地(selective sampling)：样地的选择是凭主观判断，使它能够代表所研究的生态系统。这一取样方法在植被生态研究中曾被广泛地使用，它迅速、简便，对有经验的工作者能够取得较好的结果，欧洲大陆植物生态学派的学者至今仍以这一方法作为主要的取样手段，这一方法的缺点是因为它是非统计学方法，不能进行显著性检验，因而受到统计学者的质疑。

2. 客观取样

(1) 随机取样

样方的设置是随机的，即每一样品单位被抽样的机会是相等的。理论上讲，随机取样(random sampling)是“理想”的方法，但是要真正做到“随机”困难较大，像研究者从肩上取下样方框(或样圆)随机地投掷，无论如何也达不到样品的随机分布。一般随机取样是将研究地区放入一个垂直的坐标中，用成对的随机数作为坐标值，来确定样方的位置。随机数可以取自 Fisher 随机数表，如图 2-18 所示，两个样方 A 和 B 分别由随机数对(4，4)和(55，25)所决定。

由随机数决定的样方位置，在实际研究中往往难以确切设置，尤其是在地形复杂、沟壑交错、裸岩纵横的地方更是如此，所以说随机取样真正达到随机的是很少的。随机取样的样品可以用于统计分析，从而检验样品的分布是否真正是随机的。

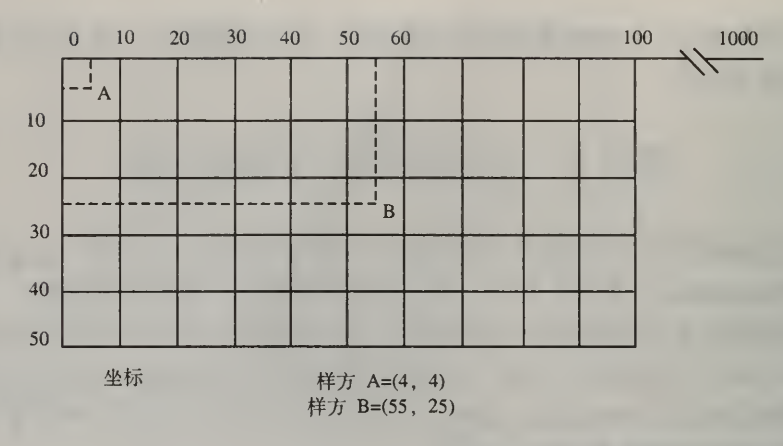


图 2-18　随机取样图示，由随机对确定样方位置

(2) 系统取样

系统取样(systematic sampling)是根据某一规则系统地设置样方，也叫规则取样(regular sampling)。比如说从山麓到山顶沿西北方向，每隔海拔 50m 设置一个样方，至于为什么沿西北方向，为什么要每隔海拔 50m，诸问题属于生态学知识范围。在多数情况下，系统取样是先用地形等因素确定第一个样方位置，比如山顶等。系统取样简单，样品分布普遍，代表性强，在生态要素变差较小的情况下，效果很好。与随机取样相比，它只要较少的样品。但是系统取样效果的好坏不能客观地评价，只能凭经验判断，其数据也不能进行统计分析，假定不要求统计分析，那么该方法是有优点的。

系统取样的具体规则变化甚大，一般由使用者自行选择。比如，随机地选择第一个样方后，可以向两个方向规则地设置其他样方；也可以同时向四个方向规则地设置样方；还可以采用纵向和横向间距不等的样方构成样方网等等，究竟用什么方式要根据所研究的生态系统类型及其分布特点和变异程度等来判断。

(3) 限定随机取样

限定随机取样(strainted random sampling)，也叫做系统随机取样(systematic-random sampling)，它是系统取样和随机取样的结合，兼有二者的优点。限定随机取样是先用系统法将研究地段分成大小相等的区组，然后在每一小区内再随机地设置样方。如图 2-19 所示，将研究地段规则地分成9 个小区，在每一个小区内随机地设置一个样方，x_i 和 y_i 代表第 i 个随机数对。使用这种方法每个区组内每个样品被抽取的机会更大，而且这样抽取的数据可以进行统计分析，但是该方法在野外可能更费时间(Chapman　1976)。

(4) 分层取样

分层取样(stratified sampling)也是将研究地段分成一些小的地段，但小地段的划分方法不是统计学方法，而是自然的界线或生态学的标准。比如在草地和灌丛交错分布的地段，可以用群落的界线为依据划分地段，再在小地段内进行随机或规则取样，分别代表草地和灌丛群落；在植被垂直地带非常明显的山地，可以不同的植被带作为地段。对同一生态系统也可以进行分层取样。分层取样简便易做，也是应用最多的方法。它的缺点是小地段的大小一般是很难知道的和不等的，所以难以进行统计分析。

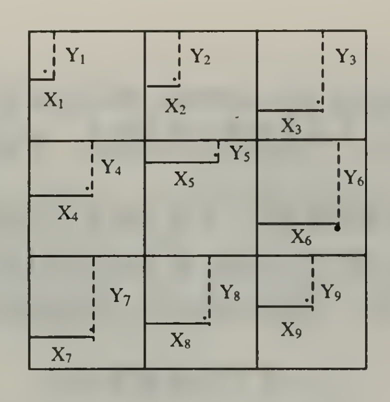


图 2-19　限定随机取样图示

(5) 集群取样

集群取样(cluster sampling)是在一个随机样点上取多个样方。比如在一个 30km×50km 的森林生态系统中用 10m×10m 的样方调查蕨类植物，因森林面积大，从一个随机样方到另一个随机样方行走的时间太长，若在一个随机样点取 40m×40m 的网格，含 16 个 10m×10m 的样方，工作效率要高的多。

(6) 环境因子取样

以上讲的取样主要是样方位置的设置，在样方位置确定后，生物种的观测值可以直接测量记录。但对生态系统中环境因素，某些因子的值只与样方位置有关，比如海拔高度、坡度、坡向、小地形变化等，可以直接测量记录。有些因子由于变化甚大，还需在样方内进行再取样，才能有较强的代表性，比如土壤样品。这种取样方法称为环境因子取样(sampling for environmental variable)。样方内再取样可以用随机取样法，也可以根据某一规则进行系统取样，后者用得较多。比如，在土壤取样时可以取5 个点，即样方的中心点和中心点到样方每个角连线的中点，得到5 个样品，我们可以对这5 个样品都进行化学分析，但这样做工作量太大，通常是将这5 个样品充分地混合，然后再从中取一部分作为所在样方土壤类型的代表样品而进行化学分析。

(7) 无样地取样

主要用于森林生态系统的研究，它是 Wisconsin 植物生态学派所创造的取样方法。无样地取样(plotless sampling)一般用于测定树种的密度，但在样树选定之后，也可得到其面积、频度等数据。无样地取样主要是测两株树之间的平均距离，由距离可以得到每棵树所占的平均面积，因而换算出密度值。根据距离定义的不同，无样地取样可有四种做法。

最近个体法(closest individual method)：距离定义为随机样点与最近一株个体间的距离。

最近邻体法(nearest neighbor method)：距离定义为最近个体(方法1 中的个体)与距它最近的邻株之间的距离。

随机对法(random pair method)：该法要求先通过随机样点划分界线，使得该线与最近个体和随机样点间的连线垂直。距离定义为最近个体(同方法1)与位于分界线另一侧

最近一株间的距离。

中点四分法(point-centered quarter method)：距离定义为随机样点与每一象限中最近一株间距离的平均值。对于一个样点要测定四个距离，该法要求事先确定好坐标系的方向。

中点四分法被认为是较理想的方法，在每个样方中可测得4 个距离，这样总的取样点数可以减少，比较省时。1956 年 Cottam 和 Curtis 经过与样方取样法比较研究认为，中点四分法的结果与实际吻合，而其他三种方法一般都有偏差。

二、样方的形状和大小

1. 样方的形状

生态学中取样单位有多种形式，包括样方、样圆、样点、样线、样带等。最常用的是方形样方，因为方形样方易于应用。从统计学角度讲，方形的边长与面积的比较小，因而边际影响的误差较小；圆形的周长与面积比更小，但是应用圆形必须使用特制的样圆，在森林和灌丛生态系统研究中困难很大。长方形一般长与宽的比越大，边长就越长，边际影响误差也愈大，在设置长方形样方时，还需考虑环境梯度的方向，如长边是否与坡向保持一致等。使用不同形状的样方所引起的差异一般是不显著的。

样点和样线在一些特殊研究中使用，前者用于草地的研究中，后者可用于灌丛和森林群落中。但在生态学文献中，它们的使用频率非常低，样带则常常与系统取样结合使用，研究者可先设置样带，然后沿样带规则地取样。在运动性较强、个体较大的动物调查研究中，研究者沿着样带一边行走，一边调查计数是最常用的方法，比如，鸟类和兽类的调查研究。

2. 样方的大小

决定样方的大小时，首先要考虑研究的目的、生态系统的类型、优势种的生活型及植被和环境的均匀性等。从统计学上讲，使用面积小而数目多或者面积大而数目少的样方可以达到同样的精确度，但样方小，取样工作量增加，计算也麻烦，同时许多样方的观测值可能很接近，给数量分析带来一定的困难。所以，样方大小要适当，一般用群落的最小面积作为样方的大小。群落最小面积定义为群落中大多数种类都能出现的最小样方面积，通常用种数--面积曲线来确定，即种数- 面积曲线的转折点所对应的样方面积。

三、取样的数量

在样方大小确定后，就要考虑样方的数目，即取样的数量。理论上讲样方数目“越多越好”，但样方太多，费时费工；样方太少，可能代表性较差，会导致错误的研究结果，一般需要客观的标准来确定取样的数目。下面介绍几种常用的方法。

1. 样方数–平均数曲线法

从统计学知识，我们知道每个样方中的平均个体数是随样方数目而变化的，当样方数较少时，平均数变化幅度较大，随着样方数目的增加，它的变化幅度逐渐减少，当达到某一样方数目时，它的变化幅度小于允许的范围(比如说5 %变化幅度)，此时对应的样方数目可以认为是我们所需要取的样方数。

这一方法比较简单，在取样过程中逐步绘制样方数-平均数曲线，如果平均数基本稳定，则可以停止取样，如果变幅尚大，取样继续进行。

2. 方差法

方差法是根据所研究的总体的方差来决定取样数目，一般方差大，取样数目就要多；若方差小，取样数目则可以少。在随机分布的情况下，取样数目 N 与总体方差 S^2 有如下关系：

$$N= t^2S^2/L^2$$

式中：t 是显著性水准值，比如在 95%置信区间内 t=1.96；L 为研究允许误差，为已知数。方差法要求取样不能少于 30 个(Wratten and Fry 1980)，总体方差可以用前 30 个样方来估计。

3. 面积比法

面积比法是在知道所研究的生态系统总面积的情况下，事先决定要选择研究面积的百分之几作为样地，比如说 5%或 10%的研究面积作为样地。这样在样方大小已经确定的情况下，样方数目是不难算出来的。比如我们研究的面积为 10 000m^2，样方大小为 5m×5m，要求抽取研究面积的 5%作为样地，即样方总面积应为 500m^2，则样方数为 500/25=20。

以上三种方法一般认为是决定取样数的客观方法，前两种方法由于都基于随机分布假设之上，在实际应用中有不少困难，研究中用得较少。面积比法对研究者有重要参考价值，但实际工作中也很少有人完全用面积比法决定样方数。在决定样方数时，研究者的经验往往起着重要作用。

第三章　农业生态学

第一节　农业生态学概述

一、农业生态学的概念及研究对象

农业生态学(agricultural ecology，agroecology)是运用生态学、经济学和系统论的原理和方法，把农业生物与其自然和社会环境作为一个整体，研究其结构、功能、内部联系、人工调控和持续发展规律的科学。农业生态学是生态学在农业领域的分支。

农业生态学研究的对象是农业生态系统。农业生态系统(agroecosystem)是在自然生态系统(natural ecosystem)基础上，经人类有计划、有目的的将自然生态系统逐步改造而成的，是带有自然生态系统某些特征的半人工生态系统。它是以农业生物为主要组分，受人类调控，以农业生产为主要目标的生态系统(图 3-1)。和一般生态系统一样，物质循环、能量流动和信息传递是农业生态系统的基本功能。

农业生态系统是一个自然、生物与人类社会生产活动交织在一起的复杂的大系统，它是一个自然再生产与经济再生产相结合的生物物质生产过程。所谓自然再生产过程，是指种植业、养殖业与海渔业等，实质上都是生物体的自身再生产过程，不仅受自身固有的遗传规律支配，还受光、热、水、土、气候等多因素的影响和制约，即受到自然规律的支配。经济再生产过程，是指农业生产是按照人类经济目的进行的，投入和产出受到经济和技术等多种社会条件的影响和制约，即受社会经济规律的支配。人类从事农业生产，就是利用并促进绿色植物的光合作用，将太阳能转化为化学能，将无机物转化为有机物，再通过动物饲养，以提高营养价值，使农业生态系统为社会尽可能多地提供农产品。同时，人类运用经济杠杆和科学技术来提高和保护自然生产力，提高经济效益。

发展农业，必须处理好人、生物和环境之间的关系。要按照生物与环境相统一的基本规律来指导和发展农业生产。种植业和林牧渔业生产都是生物体的再生产过程，各自与其环境之间建立了多种类型的“自然”的系统。只有生物与非生物环境之间相互协调、相互适应，农业生产才能获得最优化的效果。所谓顺天时，量地利，则用力少而成功多；反其道而行之，则劳而无获。农业生产是一个能量与物质流通过程，无论能量与物质提供者的环境条件或是生产者的生物体，在一定时空条件下，它们的生产能力都是有一定限度的，超过其极限，就会造成生态平衡的破坏，使自然资源衰退，农业生产下降。由于捕捞强度过大，超过了渔业资源的再生能力，致使我国主要海洋经济鱼类的资源日趋枯竭。同样，在耕地利用上，忽视养用结合，以致土壤肥力严重衰退，引起土壤退化。 在大量的物质和能量随着商品流出农业生态系统之后，就必须从外界投入足够的物质和能量，才能保持其平衡。因此，对农业资源不能只顾利用，不断索取，必须加

以保护，使之休养生息，才能促进资源增殖，提高农业产量。

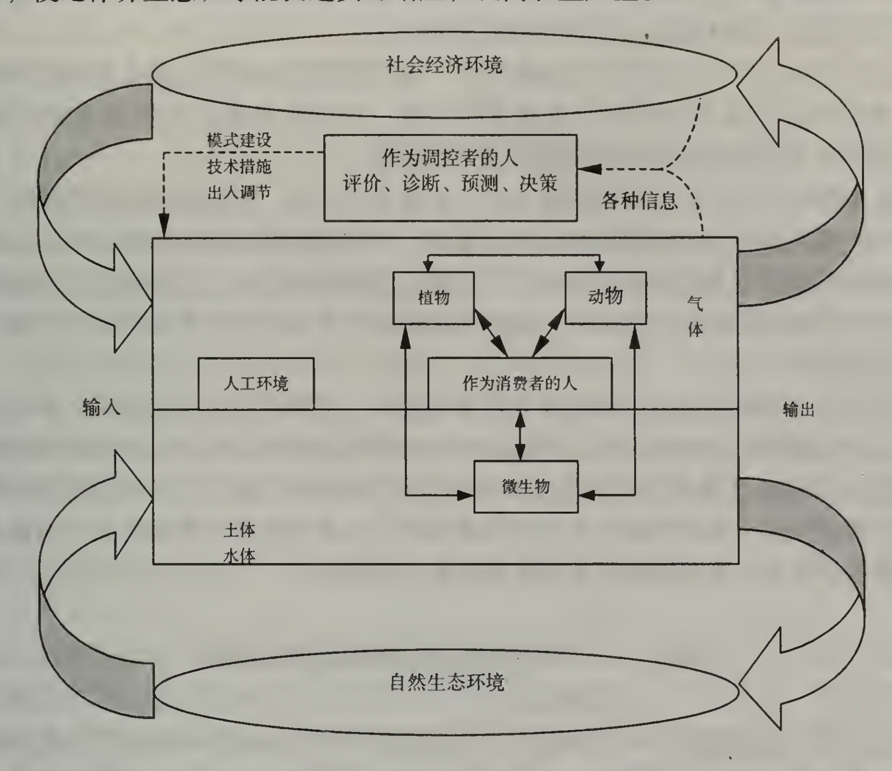


图 3-1 农业生态系统示意图(引自骆世明 2001)

农业生产是在以自然生态系统为基础的人工生态系统中进行的，它远比自然生态系统结构简单，生物种类少，食物链短，自我调节能力较弱，易受自然气候、病虫害、杂草的影响。农业生产的不稳定性，很大程度上受自然环境的约束，因此只有创造良好的农业生态环境，才能取得较佳的经济效益。良好的农业生态环境有赖于森林、草原、水域等生态系统的支持、保护和调节。农业生态系统就其生产力来说，应当比自然生态系统更高，因此除太阳辐射外，还必须加入辅助能，如农机、化肥、农药、排灌、收获、 运输、加工等，通过人类的劳动和管理，不断地调整和优化生态系统的结构和功能，才能以较少的投入，得到最大的产出，取得良好的生态效益、经济效益和社会效益，建立一个合理、高效、稳定的农业生态系统。

二、农业生态学的任务

农业生态学的任务是揭示农业生态系统各种内外因子相互关系的规律，探讨最佳农业生态系统或生态农业模式，协调农业的生态效益、经济效益和社会效益，促进农业的可持续发展。

农业生态系统是农业生态学的研究核心。在基础和应用研究方面，农业生态学要揭示农业生态系统的结构组成规律、功能运转规律、输入输出构成规律、效益与效率提高规律、系统调控规律、系统演变规律等。在应用研究方面，农业生态学为生态农业建

设、农村可持续发展、健康安全食品生产等开展现状评价、诊断和预测，提供农业优化模式的工程设计，并对配套的技术和政策提供建议。

农业生态学作为一门应用性很强的学科，揭示农业发展中三大效益矛盾统一的基本事实，阐述农业生态系统相互关系的基本原理，展现各种农业可持续发展的基本思路，为农业生态系统的调查研究提供了基本的方法。

农业是维持人类生存与发展的最主要、最基本的产业，也是国民经济的基础，人类社会文明大厦的基石。农业的持续发展关系着一个国家经济的持续发展。因此，农业和农村经济的可持续发展是我国国民经济可持续发展的根本保证。我国是世界农业起源中心之一，在长期的农业生产活动中，我国人民积累了丰富的农业生态经验和知识，值得我们今天借鉴。

但是，由于我国农业生产面临着人地矛盾突出，资源相对拥有量较少，环境污染严重与生态环境脆弱、抵御自然灾害能力差，经济高速增长的支撑力不足等问题，所以，发展生态农业已经成为我国农业走可持续发展的必由之路。从 20 世纪 70 年代末我国开始研究农业生态学以来，在这个领域取得了可喜的进展，尤其是在全国建立了许多生态农业示范区，为我国的生态农业发展提供了依据。

第二节　农业生态学的基本原理

从农业生产的运动过程可以看到，作为农业生产对象的植物和动物，其实质都是自然生态系统的组成要素。它们时时刻刻都在系统中进行着物质循环和能量转换运动，并经常保持着系统的生态平衡，从而向人们提供农、林、牧、渔业等各种产品。在人类的农业生产实践中，体现自然运行规律的生态系统是农业生产的载体。它与体现人的经济运行规律的经济系统结合，又形成统一的生态经济系统，把生态和经济两个方面统一起来，就是在农业生态经济系统。为了维护和建造良好的生态环境使现代农业与现代社会、经济协调持续发展，在农业生产中就既要遵循生态学原理，又要遵循生态经济学原理。

一、生态学原理

生态学原理是自然界生物与生物、生物与环境之间形成的相互作用、相互依赖、相互制约的内在规律，具有普遍指导意义。农业系统作为一个自然生产和经济生产的复合系统同样也应遵循这一基本规律，才能得以良性发展。农业生产建设中的生态学原理概括起来可分为下述三种。

(一) 生克与互补原理

生克与互补是自然界的普遍现象，也是农业生态学中的基本原理之一。农业生产建设中时刻体现着这一基本原理，生物与生物，生物与环境，环境要素之间的相生相克，无处不存，无时不在。所谓生克即指自然界(生态系统中)各个要素间的相互依赖，

相互促进则为生；要素之间相互制约为克。生生克克，相互联系，不可分割构成一个有机整体。所谓互补，补为助其不足也。互补则为相互补充；善其不足，使系统的组成成分及其数量趋于合理、优化、更加完善。

（二）循环与再生原理

农业生态系统中的物质循环与再生，相辅相成，相得益彰。物质在循环中再生，在再生中循环。生物为了自身生存、发育、繁殖、发展，必须从周围环境中吸收各种营养物质和能量，一方面建造身体，另一方面提供生命活动所需要的能量；物质作为能量的载体，在吸收物质的同时也就吸取了能量。生态系统中的生产者(绿色植物)从土壤中吸收水分和矿质营养，从空气中吸收二氧化碳利用太阳光能制造各种有机物，有机物以不同形式沿着食物链从一种生物转移到另一种生物体中，在转移过程中伴随着有机物质的分解和能量释放，不断损失，其损失的物质和能量又返回环境重新为植物所利用，由此，构成一个从无机到有机再到无机……，从无序到有序再到无序……的物质循环。正常的物质循环和能量流动，有利于保持生态系统平衡、稳定及系统生产力的提高，反之亦然。

农业生态系统中各要素如果按照自组织原理自发形成、自由组合在一起，就会形成种种合理的结构，最终使得复合农业生态系统的结构合理，功能健全，物质流、信息流、价值流均能正常流动，系统最稳定，净生产量最大，并且能够永久维持，周而复始。这种系统我们称之为良性循环的农业生态系统，也是我们发展生态农业的主要目标。

（三）平衡与补偿原理

农业生态系统是一个开放系统，在系统形成、发育、演替过程中，始终与周围环境进行着物质、能量交流。系统中各种生物及其构成的生物群落中的生物种类、数量、种间关系与外界环境的变化，都影响整个系统的变化。农业生态系统是一个动态平衡系统，也是一个反馈调节系统，内部具有一种自动调节的能力，以保持系统自身的相对稳定性。这种调节能力取决于系统存在的反馈机制，组成的多样性及物质和能量流动循环的复杂性。一般来讲，在成分多样，能量流动和物质循环途径复杂的生态系统中，较易保持稳定，因为系统的一部分发生机能障碍时，可以被其他部分调节、更新、补偿。例如，一个复杂的生态系统不可能使单一的种群大发生，天敌可以阻止任何一个种群达到足够大的数量，以致扰乱了内部的平衡。

农业生产是人类有计划、有目的的利用生物的特殊机能来进行的生产活动，它以农业生态系统中的经济产量输出为目标。在该系统经济产量的形成和输出过程中，各个生态要素综合起来对农产品的生产、高产和稳产产生作用。为了使农业实现高产、高效、优质，要求各个生态要素的齐全，即光、热、水、土等的完全配合，还要求结构具有完整性和合理性。

农业生态系统也是一个以人类参与为主要特征的生态系统。因此，农业生态系统的平衡既包括系统内部生物与其生存环境之间的平衡关系，组成要素之间的制约关系，系统之间的反馈关系，还包括人类社会经济、技术与农业生态系统的生产力之间的平衡关系。由此可见，农业生态系统的平衡是人类社会与自然相互作用的综合表现，与人类社会的经济活动息息相关。农业生态系统的平衡关系虽然可以通过生态系统的自动调节进行恢复，但是，更重要的是需要人类有目标的控制、补偿活动，再经农业生态系统的结构、功能作用来实现的。如限定砍伐定额、植树造林、封山育林、种草、适时适量的施肥、灌溉等；有计划、有步骤地调整农业生态系统的结构布局，使系统结构物质供给、循环逐步趋于合理化，适应于当地生态环境及社会经济发展的需要。相反，在超过生态阈值的负向干扰下引起农业生态平衡失调之后，会加剧生态环境的恶化。在这种情况下，再要建立新的平衡关系是十分困难的。

人类是生态系统中最积极、最活跃的因素，他既是生态系统中的消费者，也是生态系统的参与者。农业生态平衡应该也必须包括人类自身与农业生物之间的平衡关系；应该也必须包括人类有目的的、合乎自然规律的各种生产、经营等实现农业生态平衡的手段。人类为了最大限度地满足自身的生存与发展的需要，一方面在努力营造自己生活的美好家园，创造史无前例的物质文明；另一方面，在不合理的开发利用自然资源过程中，使生态环境遭到空前的破坏。随着现代工业的迅速发展，人类对农业生态系统的影响日趋深刻而又广泛。大量有毒有害的“工业三废”和“生活废弃物”通过不同途径进入农业生态系统，严重影响着生态系统的平衡基础，甚至使生态系统濒临毁灭。农药杀虫剂的大量使用，首先污染了初级生产者，然后沿着食物链和营养级逐级向前传递，以致整个有机界都受到农药的污染，并通过食物链逐渐富集，从而直接影响到了人类的生存与健康。

农业生态系统代表着一种非常复杂多样的动态交错平衡，它是在人类、生物、环境和时间等生态因子相互联系、相互制约、相互适应的交互作用中，使系统的发展朝着前进或倒退、上升或下降、高效或低效、丰足或灾欠、繁荣或衰退的方向不断变化演替的过程，即由平衡—不平衡—新的平衡—新的不平衡的远离平衡演替过程。在这个演替过程中，人类在农业生态系统中的作用愈来愈强。但是，人类从事农业生产仍受环境和时间的制约，生物的生长、发育和繁殖都要与生态环境和时间因子相适应。绿色植物作为农业生态系统的主体，在维持系统平衡和发挥系统功能等方面起主导作用，所以，我们在农业的生产建设中，必须认真研究和运用客观存在的生态系统的自然演替规律和现代科学技术，保护自然资源，改造农业生态环境，保持其动态平衡和协调关系，才能真正使我国的农业稳步、健康地向前发展。

二、生态经济学原理

农业系统是一个由农业生态系统和农业经济系统组成的复杂的开放的复合系统。其中农业生态系统是由生命系统和环境系统在一定空间内组成的具有一定结构和功能的有机整体；农业经济系统是由农业生产系统和生产关系系统组成的有机整体。二者结合形成一个相互贯通、相互作用的，以物质生产、消费循环流动为主要特征的复杂系统。既

然如此，在农业生产建设中应该也必须遵循以下三个生态经济基本原理，即生态经济结构合理性原理、生态经济功能良好的原理和生态经济综合效益高的原理。

（一）生态经济结构合理性原理

系统论指出，任何系统都是具有一定结构和功能的有机整体。系统的结构就是组成该系统的各要素之间的内在联系，农业系统作为复合系统，它的结构应该也必须包括农业生态系统和农业经济系统两个方面的结构。农业生态系统结构是由系统中生物子系统和环境子系统相互作用、相互联系构成的，这种结构又是以农业生态系统中的各种生物群体间及生物群体同环境子系统间的营养关系(即食物链关系)为基础建立起来的，它是生物与环境相适应的结果，也是生物长期进化的产物。人类通过长期的农业劳动，使农业生态系统也在不断发展变化，与此同时也建立起了以人类活动为核心的农业经济系统。当然在农业经济系统中相应也有其结构，这种结构表现为一定的农业方面的生产结构、流通结构、分配结构、消费结构及所有制结构等，其中农业生产结构是农业经济结构的基础。而在农业生产结构中，又具体包括农业产业结构、农业技术结构、农业经济组织结构、农业区域结构等，其中农业产业结构又是农业生产结构的基础。因此，通常研究农业经济系统的结构时都侧重于研究农业生产结构，而在研究农业生产结构时，又侧重于研究农业产业结构，可见，农业产业结构是农业经济系统结构之核心，尤其是农、林、牧、副、渔、工业各产业之间的比例是否合理至关重要。

既然农业系统是农业生态系统和农业经济系统的复合系统，那么，该复合系统也应有其相应的结构，这种结构就是生态经济结构。生态经济结构其实是人类为满足自身生存与发展的需要，在长期实践中通过逐步改造原有的自然生态系统结构基础上，形成的一种农业生态结构与农业经济结构的复合结构，它是人类与自然长期相互作用的结果，农业生态结构与农业经济结构相互联系，互为条件，融为一体。人类成为这个复合结构的纽带和桥梁。显然人类是影响这个结构的主导因素，生态经济结构是否合理，关键取决于人类能否遵循生态学原理和经济规律去合理调整配置和协调组合生态农业系统的各要素间的相互关系。因此在生态农业建设中，对如下几方面尤其应该引起足够的重视。

第一，农业系统中的生态经济结构，构造整体要协调，相互匹配，不可背离。既要维护其独立性，稳定性，又要具有适当的可调节性，以求整个系统的功能发挥。

第二，系统组成的完整性，复杂性。从系统组成要素看，任何一个农业系统的结构都包括以下三个子系统：① 生物群落子系统，其组成包括一定的农作物结构，森林、畜禽、鱼类及野生动植物等所组成的一定生物群落结构；② 非生命环境子系统，包括由土壤、地形、地貌、水、光、热、矿物元素等组成的环境系统结构；③ 农业经济系统中包括的诸经济要素，如资金、劳力、固定资产、产业布局和结构等。由此可见，任何一个农业生态经济系统的结构都是由多因素、多层次、多序列、多量度、多子系统结构复合而成的网络结构。

第三，系统结构组合要充分反映与地区生态优势(条件)及市场需求的一致性。农业

系统的生态经济结构中各要素之间的组合比例关系，既要有利于形成良性循环的生态结构， 也要形成有利于地方经济持续、健康发展的良性经济结构，要注意统筹规划，互相兼顾，不可偏废。

第四，农业生产的生态经济结构要反映出与地域生态优势(条件)相适应的各组成要素在时间和空间上的布局方面的内在联系。切记不可死搬硬套，必须从实际出发，具体情况具体分析。农业生态系统和农业经济系统的各种要素都要在一定的空间中才能组合成一定的农业系统，这些生态系统要素与农业经济系统的诸要素的空间组合关系不同就会形成不同的农业生态经济结构，只有当这种空间组合方式符合生态经济规律时，才能形成合理的农业生态经济结构。

由此可见，农业的生态经济结构是：系统内各要素在空间、时间、数量比例关系及输入输出关系等的本质的有机联系。在农业生产建设中，只有按生态经济规律，运用系统工程方法，对各系统要素具体分析，总体运筹，整体规划和优化组合，才能使一个农业系统的生态经济结构达到最优状态。

（二）农业系统的功能原理

系统的结构与系统的功能二者相互依赖密切相关。结构是功能的基础，功能是结构的表现，结构决定功能，而功能又反作用于系统结构。农业系统作为一个农业生态经济系统是一个典型的耗散结构，开放性系统，它是靠系统的物质和能量的交流和循环及信息与价值的流动指导农业生态系统和农业经济系统的各要素及组分紧紧连在一起构成的一个有机整体。物质循环、能量流动、价值增值和信息流动既是生态农业系统的四大基本功能，也是农业系统形成与发展的基础和原动力。

1. 农业系统中的物质循环功能

农业系统中物质循环表现为农业生态系统中自然物质循环和农业经济系统中的经济物质循环及两个子系统间的自然物质和经济物质的相互流动和转化。

1) 农业生态系统中的自然物质循环突出表现为沿着生态系统的食物链传递循环。这一循环存在于任何一个具体的农业生态系统中，它是以生物有机体为物质运载形式进行不断流动和转化的。自然物质的循环过程周而复始，循环往复，推动着农业生产系统的不断发展，为农业经济系统的物质循环奠定了物质基础。

2) 农业经济系统的经济物质循环是通过农业社会再生产过程的生产、流通、分配、消费这四个环节周而复始地进行着的。它具体包括农业生产及加工过程中的物流，农产品流通过程中的物流和农产品消费过程中的物流等。

3) 农业生态系统的自然物质和农业经济系统中的经济物质的相互转化可表现为以下三个方面：其一是在农业生态系统的自然物质循环的各个环节上都要产出一批农牧渔产品和副产品，它们都可以成为农业经济系统中从事加工、流通和消费的经济物质源泉。其二，农业经济系统通过向农业生态系统投入一定量的经济物质(化肥、农药、除草剂、地膜等)，促使农业生态系统产出更多的自然物质。但是投入农业生态系统的经

济物质的量必须是适当的，操作技术必须是合理的，否则系统功能发挥将受到影响。其三，农业经济系统在生产加工、流通和消费过程中必然要产生部分废弃物质，这些废弃物最终将以不同形式，通过不同途径返回农业生态系统，再次成为农业生态系统中循环的自然物质。值得注意的是在农业经济系统的物质生产加工、流通和消费中所产生的废弃物如何返回农业生态系统，才能有利于系统中的良性物质循环和有效利用，且不损失系统自身的功能。在生态农业系统中，废弃物质往往通过各种方式进行回收、处理和综合利用(如秸秆、过腹还田、猪肥沼气池处理等)，使其变为有用物质。

2. 农业系统中的能量流动功能

生态农业系统作为农业生态系统和农业经济系统的复合系统，显然其能量流动是农业生态系统中自然能流和经济系统中经济能流的有机结合。两个系统的能量流动既有各自的独立性，也有其相互依赖性，二者相互促进，相辅相成。自然能流的实质主要是太阳能进入生态系统中通过绿色植物的特殊生理机能将太阳能转变为生物质能等。然后这种能量沿着食物链渠道进行流动。它的流动具有单向性和递减性的特点。而经济能流是指用于农业经济系统中的物质生产、流通和消费中的能量，不仅具有各自独特的循环流动特点，而且还可以相互转化。一般来说转化途径有以下两个方面：

1) 农业生态系统的各种生物中流动和储存的自然能量以多种形式被人类转化为经济能源，如现在全国很多生态农场、生态村等将饲养业所排出的各种有机废物(畜禽粪便)及部分秸秆通过特殊工艺汽化形成燃气(一氧化碳或甲烷)，作为经济系统的生产或消费用能。

2) 农业经济系统中的各种经济能量，随着农业现代化的不断提高及生态农业的不断发展，也越来越多地以多种形式转化为农业生态系统中的自然能源。通常人类是以能量投入的方式来为农业生态系统的生物生长发育创造一个良好的环境，以求生态系统的高产、稳产、高效。如现代化大型鸡场的灯照明，大型越冬性养鱼池或鱼种鱼苗繁殖基地的锅炉加热池水，大量石油转化为化肥投入土壤的过程等。随着农业现代化水平的不断提高，农业经济系统与农业生态系统之间的能量流动日趋增加，关键是要使农业经济系统与农业生态系统之间的能量流动在数量和方式上科学合理，符合生态经济规律，使农业生态经济系统中能量流动高效合理，有利于提高生态效益和经济效益。

3. 农业系统的价值增值功能

农业系统的增殖功能是与单纯农业生态系统的重要区别。这是因为，农业生态经济系统是通过与人类劳动结合而成的有机体。而人类的农业劳动又分为具体劳动和抽象劳动，具体劳动创造了使用价值，抽象劳动创造了价值，商品的使用价值在商品经济的流通中形成农业系统中的物流、能流和价值流(value flow)，随着使用价值的流动，必然也相应产生价值的流动。事实上，农业系统中的价值包括两个主要方面：

1) 价值的投入过程。即价值向农业生态系统中的输入过程。由于农业生态系统是一个人工生态系统，在农业生产过程中，人们要按照一定的生态规律和生产需求组成其种植业、养殖业和畜牧业，而人们在发展种植业、养殖业和畜牧业的过程中，总要投入一定资金用于购买新品种、肥料、农用物资和进行灌溉，农业基础建设，植树造林等，

这就构成了农业经济系统向农业生态系统的价值投入过程。科学合理的价值输入是生态农业系统增值的基础。

2) 价值的输出(产出)过程。当向农业生态系统中输入价值后，在各种生物的作用下将其转成各种生物和非生物物质后，经过自然再生产过程产生各种种植业产品(粮、棉、油、菜、果等)、养殖业产品(鱼、虾等)和畜牧业产品(牛、羊、猪、鸡肉、蛋、奶等)。这些使用价值或者直接作为商品出售，实现其价值，或者经过经济系统的加工增殖后再把新产品出售，以实现更多的价值。由此构成了生态农业系统的价值产出过程。所谓生态农业系统的价值流过程，即价值的输入和输出形成了农业系统中的价值流，其循环特点为非封闭式、螺旋式上升的价值增值趋势。不过只有价值产出量大于价值投入量时，才能说明生态农业系统的经济效益较好。这也是生态农业建设中所期望解决的重要方面之一。价值的输入和输出，以及价值的实现是一系列复杂的生产、经营、管理活动的综合，能否真正把不同农业系统的生态优势转化为经济优势，并得以实现将是农业生产建设中需要认真研究、探索解决的问题。

4. 农业系统中的信息流动功能

农业系统是一个充满各种信息的信息系统。因此，在系统中的物质循环、能量流动、价值增值的过程中，必然要伴随着信息的产生、传递、转化和流动。在这些信息中，除了农业生态系统中的自然信息流(如生物之间存在着的物理、化学和行为等信息)用以调节、控制觅食，求偶寻路等活动外，更多的信息是人类在管理生态农业系统过程中所形成的经济信息，如资源信息、市场信息、价格信息、管理信息、决策信息、环境污染、治理污染源信息、价值投入产出信息等等。人类在控制生态农业系统过程中是通过信息流动来调节控制生态农业系统中的物质流、能量流和价值流的，而这个过程实际上也是一个信息的获取、存贮、加工、转化和传递的过程。人类只有及时地全面地获取农业系统中的各种生态经济信息，并根据这些信息通过认真而又科学的加工处理，再做出决策信息，才能有力地控制和调节系统内农业的自然再生产和经济再生产，进一步促进生态农业系统内的良性循环和协调发展。所以，农业系统中的信息流好似系统的“中枢神经系统”。一般来说，系统内信息流动畅通，信息流量大，信息处理科学，决策信息准确，系统就能得到良好管理和调控；倘若系统信息流通不畅，信息可靠性差，整个农业系统的自然再生产和经济再生产就可能失调和出现混乱，甚至系统崩溃。由此可见，在农业生产建设中充分应用先进信息技术，及时有效调控系统是农业系统协调发展的重要保证。

(三) 农业系统的综合效益原理

农业系统是一个以人类参与调节控制为特征的、农业生态系统和农业经济系统有机结合的复杂系统。它有其自身的发生、发展规律，即生态经济规律，有自身的结构和功能，也必然有其自身的整体效益。农业建设的最终目标是实现生态效益、经济效益和社会效益的统一。

农业生产建设中生态、经济和社会的效益概念

生态效益(ecological effect)即人类在参与、调节和控制自然再生产和经济再生产过程中，人类生产经济活动与自然之间的物质、能量交流对农业生态系统，尤其是对生态环境产生的效果和影响。经济效益(economic effect)是指农业在促进社会经济发展方面的效果，包括劳动者通过农产品商品交换后获得的可用于扩大再生产和改善生活的利润，国家通过各种农业税从农业中获得的资金，以及农业生产和再生产过程中劳动占用和劳动消耗同农业生产成果的比较。社会效益(social effect)通常是指农业在满足人类社会最基本需要的效果，这些基本需求包括食物、衣着、燃料、住房和就业机会。人类是自然再生产和经济再生产过程中最积极、最重要的因素，也是农业建设的决定因素。尤其是可持续发展农业的兴起与发展大大推动了人类社会及社会经济的进步和发展，为人口资源优势转化为经济优势提供了广阔的前景，从而也为人们生活水平的提高、人员就业、人口资源的发挥提供了前所未有的良好机遇，使社会经济持续、协调发展，人人有所为，国泰民安。这就是农业生产建设显示的具有深远的战略性意义的社会效益。生态效益、经济效益和社会效益是辩证统一的。

农业系统是由农业生态系统、农业经济系统和以人类为核心的社会系统共同组成的有机整体。生态效益、经济效益和社会效益三者互为条件，相互依赖、相互促进、相互联动。生态效益是经济效益的基础，经济效益是生态效益的表现，社会效益又是生态效益和经济效益的目标，因此，农业生产建设的最终目标是生态效益、经济效益和社会效益同步提高，社会经济的协调发展。由此可见，在农业生产建设中，要实现生态效益、经济效益和社会效益相统一，必须处理好如下三个关系：

1) 正确处理人地关系。能否正确认识和处理人与自然的关系是直接关系着人类能否遵循生态经济规律办事，促进生态经济协调发展的核心问题。在这一问题上一直存在着不少片面的、甚至是有错误的认识和观点。长期以来，把人与自然的关系视为征服者与被征服者的关系，人被视为是凌驾于大自然之上的无所不能的主宰者。人们过分陶醉于对大自然的暂时的胜利，把自然界当作任人摆布的消极客体，企图凭借人类创造的技术圈和智慧圈同生物圈对垒，为所欲为地对大自然施加影响和压力。一方面把大自然当作取之不尽，用之不竭的“供奉者”，掠夺性地开发甚至肆意挥霍自然资源，以满足人类一时的生产和消费的满足；另一方面又把自然当作一个“垃圾桶”，将人类生产和生活废弃物毫无顾忌地倾入生态环境中。结果使自然生态系统结构破坏，功能下降，饱经沧桑，斑痕累累。事实证明：如此对待自然，无疑是十分错误的。无数事实告诫我们，在人类社会发展到今天这样具有高度物质文明的时期，同时也给人类社会发展埋下了严重的隐患。人类必须改变人地关系的旧观念，建立与自然和谐相处的“伙伴关系”，牢固树立正确的自然观和发展观，即人类来自于自然，依赖于自然的思想。在人类社会的经济发展过程中，必须遵循生态经济规律，运用现代科学技术积极作用于自然界，努力开发自然资源，在维护生态平衡、改善生态环境的前提下，去不断提高生态系统的综合生产力，为人类社会的进步和经济的持续发展服务。但在改造、开发利用自然的过程中，切不可以征服者自居，而应该把自然界视为休戚相关、利害与共的“伙伴”，这才能真正保持人与自然的和谐相处，才能确保社会经济的持续、稳定和协调发展。

2) 正确处理生态效益和经济效益的关系。由于生态农业系统是一个农业生态系统和农业经济系统相结合而成的复合系统，农业生产依赖于一定的生态环境，所以，客观上就要求在农业生产过程中必须首先考虑生态效益，在生态环境改善和生态效益不断提高的基础上，提高经济效益，这是因为生态效益是经济效益的基础，二者相互联系，相互作用，相辅相成。生态效益的提高可为农业自然再生产创造良好生态环境，增强农业环境条件及农业生态系统抵御各种灾害的能力，同时也为农业经济再生产和经济效益的提高奠定了坚实的物质基础。经济效益的不断提高也为生态环境的进一步改善增强了实力，同时也可促进农业生态效益的进一步提高，使农业系统中生态效益、经济效益进入良性循环，生态经济综合效益不断地提高。

3) 正确处理生态经济效益与社会效益的关系。生态农业作为新兴的现代农业生产体系，适合我国人口基数大、资源相对拥有量少、气候跨度大、地势复杂、市场经济处于初级阶段、生产力水平尚低这样一个基本国情，在可持续发展农业建设中，生态效益、 经济效益和社会效益三者之间，生态效益是基础，经济效益是桥梁，社会效益是目标，这是因为在中国，尤其应该特别注意在经济建设的同时注重保护自然资源。在农业生产建设的过程中，只有将人口资源优势与生态优势结合起来，传统农业技术的优势与现代科学技术优势结合起来，农业生产建设与地方经济建设结合起来，自觉应用生态经济规律去指导农业生产，才会使我国的农业生产建设拥有永恒的动力，蓬勃发展下去。

第三节　农业生态系统的结构

农业生态系统的结构是指农业生态系统组分在空间、时间上的配置及组分间的能物流顺序关系。系统结构是维系系统功能的重要前提，结构决定功能，功能又反作用于结构，一旦系统结构组织不合理或受到破坏，系统功能就会遭到严重损坏。因此，要想建立功能强的农业生态系统，设计构造合理的系统结构是至关重要的。这在生态农业建设中尤其有着特殊的意义。

根据地理范围、时空、功能特征及系统目标，可将农业生态系统划分为层次结构、物种结构(组分结构)、时空结构(主要包括水平结构、垂直结构、时间结构)和营养结构(即食物链结构)。

一、农业生态系统的等级结构和层次结构

(一) 农业生态系统的等级结构

农业生态系统是一个由人类—生物—环境所构成的多层次、十分复杂的系统。 为了便于研究在农业生态系统建设中的应用，根据范围大小、生物气候、地貌特征等，将大系统分为若干等级：

一级：全世界整个人类的农业生态系统；

二级：根据气候带划分农业生态系统，如赤道、热带、亚热带、温带、寒带的农业生态系统。

三级：根据地形、地理位置划分的自然大区农业生态系统，如暖温带内，由东向西可划分为：海岛区、沿海平原区、沿海山地区、内陆平原区、内陆山丘区、内陆高原区、内陆干旱草原区等农业生态系统。

四级：根据小地形、小气候区分的农业生态系统，如在内陆山地区可区分为谷地区、台地区、低山区、中山区、高山区农业生态系统等。

五级：在自然小区内，根据自然和历史原因，对经济上联成一体、大小不等的农业生态系统进行划分，如一个农场、牧场、林场、渔场或村落，乃至一到几个农户。

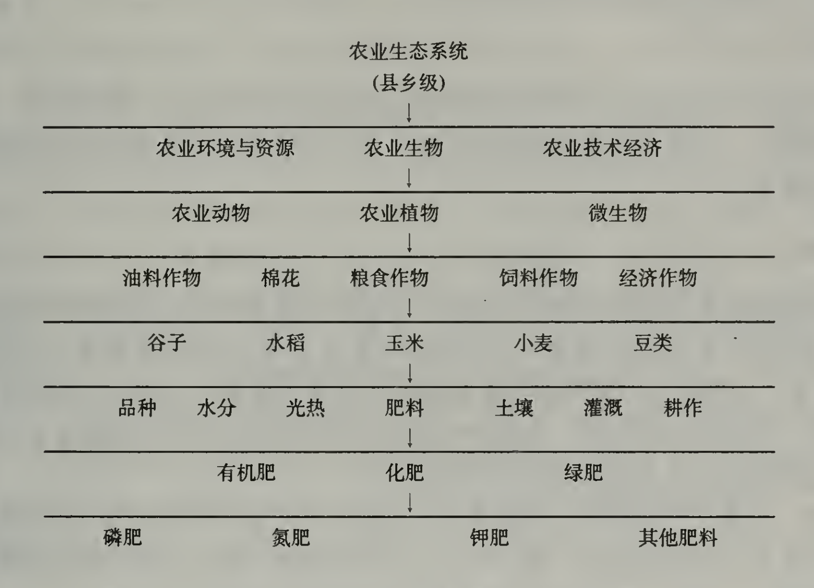


图 3-2　农业生态系统层次结构示意图(引自杨文宪等　1999)

(二) 农业生态系统的层次结构

任何一级农业生态系统都可以分为几个层次，划分层次的目的在于能方便地研究、了解和合理组织系统各个要素，以求达到结构合理、科学，最终获得最佳的系统功能。

农业生态系统层次结构如图 3-2 所示。在一个农业生态系统内，每个层次都是彼此相关的，在系统中各自发挥着不可代替的重要作用。

二、农业生态系统的基本结构

农业生态系统是由农业生物(植物、动物、微生物)、农业环境与资源(大气、土壤、水域)和农业技术经济(农业商品交换、农业组织管理、农业科技文教)3 个亚系统和 9 个亚亚系统组成，形成严格有序结构，各系统内又按严格顺序、层次构成。农业生物

物种是生态系统物质生产的主体。不同生物种类的组成与数量关系的格局构成生态系统的物种结构(详见第二章)。

三、农业生态系统的时空结构

(一) 农业生态系统的空间结构

农业生态系统的空间结构(spatial structure)是指因农业生物群落在空间上的垂直和水平格局变化，而构成的空间三维结构格局。

1. 水平结构

指在一定的生态区域内，各种生物种群或类型所占面积比例、镶嵌形式、聚集方式等水平分布规律，即通常所说的区划和布局。其最佳结构应与当地自然资源相适应，并能满足社会要求。

2. 垂直结构

指生物种群在垂直空间上的分布格局。在地上、地下都可形成不同的垂直结构。地上部分主要研究复合群体茎枝叶在空间的合理分布以求得群体最大限度地利用光、热、水、大气资源；地下部分主要研究复合群体根系在土壤中的合理分布，以求得土壤水分、养分的合理利用，达到种间互利，用养结合的目的。根据生态空间内各种作物群体组合状况，垂直结构可分为6种类型：

Ⅰ-1型：即单一作物群体，其地上部分与地下部分在同一层次内。特点是前期自然资源利用不充分，而后期争光、热、水、气、养分现象严重。从生态学的观点看，这不是理想的结构。

Ⅰ-2型：如小麦与蚕豆间作，地上部分处于同一层次，地下部分深浅不同。这种群体组合对地下部资源利用较为合理，但地上部则会出现资源竞争现象。

Ⅱ-1型：如玉米与豆科、棉花或芝麻间作，其地上部高矮搭配，资源利用较好，地下部处于同一层，资源利用不理想。

Ⅱ-2型：如河北枣粮间作，河南桐粮间作，地上部高矮秆，地下部深浅根，地上地下资源利用都较好。枣粮间作中，粮食产量比单作高7%，还产小枣229.5kg。

Ⅲ-1型：与Ⅱ-2型基本相同，只是在高矮作物中加种果树，形成地上部分上、中、下相配合的三层楼结构，地下部分资源利用较好。这种结构在我国的福建、两广、江浙多见，在湖北省崇阳县和山西省的晋南、晋东南地区也有玉米、大豆、甘薯三层楼间作结构。

还有一些特殊类型，如南方的桑基鱼塘结构、稻鱼结构、稻萍结构、果菇结构、蔗菇结构及湖北省的稻田养鱼和塘边种葡萄、塘上搭鸡笼、鸡笼上有葡萄架遮阴，形成鱼、鸡、葡萄结构。

（二）农业生态系统的时间结构

农业生态系统的时间结构是指在生态区域内各生物种群的生长发育和生物量积累与当地资源协调吻合状况，即各生物种群生活周期在时间分配上形成的格局。不同地区，自然资源(光照、积温、降水、土壤等)条件不同，相应为作物提供的资源数量、质量不同，从而使各地不同农业生态系统结构特征也随时间发生相应变化。因此，如何根据当地自然资源的时空变化规律，进行合理安排，科学布局作物种群，才能使自然资源得到充分利用，才能得以提高系统综合生产力，提高系统综合生产效益，并能减少投入，增加收益，防止农业环境质量下降，这是合理利用时间结构的重要研究课题。作为拥有几千年文明的农业古国，我们有着丰富的传统农业技术，如育苗移栽、间作套种、轮作倒茬、插种混播等形式，都是充分利用时间空间获得高额产量的优秀传统技术。

时间结构涉及的因素有环境条件的季节性和生物的生长发育规律。一般来说，环境因素在一个地区是相对稳定的。因此，时间结构控制主要是农业生物的安排，即根据各种生物的生长发育时期及其对环境条件的要求，选择搭配适当的物种，实现周年生产。搭配的方法有长短生育期搭配，早、中、晚品种搭配，喜光作物与耐荫作物时序交错，籽粒作物和叶类、块根类作物交错，绿色生物与非绿色生物交错，设置控制措施延长生长季节，化学催熟等。如水稻、棉花、蔬菜、瓜果、果树、林木等都是先培育幼苗再进行移栽的。另外，小麦套种玉米或棉花，棉花套种蚕豆或油菜，芝麻套种黄豆、绿豆、花生等，也都是利用时间结构的良好形式。再加近年引进发展起来的地膜覆盖、塑料大棚、日光温室等现代新技术，更使农业生态系统结构发生了深刻的变化，也为农业生产的发展开辟了一条高产、高效、快速、稳定、持续发展的新途径。

在农业生产过程中，调节农业生物群落时间结构的方式有套作、轮作、轮养、套养等。

作物套作：将不同物种的不同生育时期安排在同一地块，按其生育特点嵌合在一起，充分利用空间、养分等资源，扩大产出。如在华北冬小麦套玉米、花生、棉花等，可充分利用小麦收获后的光温资源，还可解决小麦、玉米一年两熟所需积温和光照不足的矛盾，达到两茬作物互相兼顾，高产稳产。

作物轮作：如湖南的豆稻轮作方式。春天播种春大豆，大豆收获后种植晚稻，晚稻收割后耕翻土壤，冬闲晒垡。这种轮作，一方面可以使土地得到休闲，通过冬天的冻土晒垡，改善土壤的理化性状，增强好气性微生物的活动能力，加速土壤有机质的分解；另一方面，大豆根瘤菌的固氮作用可使每公顷土壤增加游离氮素 100~150kg，从而促进农田养分平衡，减少化肥用量，提高稻谷产量。

动物轮养和套养：鱼类的轮养和套养大体有 3 种类型。第一种是春季一次放足大小不同规格的鱼种，然后分期分批捕捞，使鱼塘保持合理的储存量。第二种是同一规格的鱼种多次放养、多次收获，使鱼塘的捕出和放入鱼种尾数基本平衡。第三种是同一规格的鱼种春季放完，到冬季干塘时才收获一次，但由于饲养过程个体生长参差不齐，部分可以提早上市，因而该部分可以多次收获。

四、农业生态系统的营养结构

(一) 营养结构的基础

农业生态系统中的各种组分之间最重要的联系之一是通过营养关系来实现的。生态系统中的营养结构即指生态系统中生物间构成的食物链与食物网结构，它是农业生产中生产者、消费者和分解者之间以食物营养为纽带所形成的系统内物质循环和能量流动为内容的内在联系。

一个复合农业模式通常具有 3 个不同营养级：即植物生产者、动物消费者和微生物分解还原者。食物链(food chain)指生物成员之间通过取食与被取食的关系所联系起来的链状结构，是生态系统营养结构的基本单元。食物链是生态系统中物质循环与能量转换的一个重要过程，也是生物之间相互制约的关键机制。同时，它也是生态环境质量水平的主要标志之一。食物链由生态学的一个重要规律——金字塔规律(也称十分之一规律)所决定。人类是自然食物链中的一个重要环节，因此食物链原理也必然适用于人类本身。根据食物链在生态系统中的特殊功能，按照物质循环和能量转化的一般规律，通过引入新的链环，延长或完善食物链组合，可增加第二、三级产品。延长食物链的方式主要有增加生产环(绿色植物)、引入转化环(动物或微生物)和抑制环(生物防治等)。

(二) 营养结构的类型和扩展

在长期的进化过程中，与不同的自然环境条件相适应的生物群落构成了不同的生态系统，加之人类的有计划、有目的强行干扰就形成多种不同的食物链结构。因系统内食物链结构的差异，使得不同生态系统或同一生态系统食物链结构不同，造成对自然资源的利用也出现明显的差异。如果在食物链中针对性地增加新环节或扩大已有环节，根据系统功能和目标科学调节生物(作物)种群比例，会使食物链中各种生物更加充分地、多层次地利用自然资源，增加高能量高价值的产品生产。这一方面可以有效抑制有害生物危害，增强系统的稳定性，提高系统的生产力；另一方面可以使原来未被利用的物质经再转化，增加系统的生产量，提高其生态效益、经济效益，充分利用资源。根据农业生态系统中物质转化的生产方式，可将食物链结构分为食物链加环和产品链加环。

1. 食物链加环类型

在原有食物链中引入或增加新的环节，可提高系统的生产力和稳定性。

1) 生产环。在原有食物链中加入一个或几个新的环节，能够将非经济产品转化为经济产品，这种新的食物链环节称为生产环。它可分为一般生产环与高效生产环。

① 一般生产环。把低价值、低能量的产品，或把以往称为废弃物的资源转化为高价值、高能量与高效用的经济产品，如饲养牛、马、羊、猪、家禽等，这些动物大部分以农副产品，如秸秆、秕糠、饼粕、菜叶、草和部分粮食为饲料，而生产的产品是供人类食用的肉、奶、蛋食品和皮、毛等生活必需品。

② 高效生产环。凡是某种生物需要的资源或产品不能为人类直接吸收利用或直接取得的，须经过加环转化后方可产生高效或经济产品的食物链环结构，称为高效生产环。如在蜜源植物开花之际进行人工放蜂，利用蜜蜂特殊的吸收、消化和酿制本领，生产出价值高的经济产品如蜂蜜、蜂乳、蜂胶、王浆等，同时由于蜜蜂的授粉作用，可以使许多农作物和果树提高授粉率，增加产量。例如我国油茶林引入蜂群，使油茶的结实率提高 1.7~2.4 倍，并使冬季每群蜂产蜜 15kg，蜂群数量增加 1 倍以上。北京郊区利用蜜蜂为多种留种地蔬菜授粉，蔬菜种子结实率普遍提高 20%以上。此外，在林间放养白蜡虫、紫胶虫，利用这些寄生虫分泌的物质，为人们提供用途广、经济价值高的工业原料和药材。这些都具有高效生产环的功能。

2) 增益环。这种食物链环节本身转化的产品并不能直接为人类需求，而是为了扩大生产环的效益所加入的环节。例如利用残渣中的营养成分，形成高蛋白饲料；利用粪渣、垃圾、沼渣等有机废弃物养殖蚯蚓和蝇蛆。蚯蚓和蝇蛆对人类并无直接利用价值，但它们是鸡、猪等的优质蛋白饲料。由于增加动物蛋白质营养、生长快、产量高、质量好、效益高，故蚯蚓、蝇蛆可视为增益环，提高畜禽的生长量和产蛋率，为人们提供更多的肉、禽和蛋产品，降低饲料成本，提高效率。以蚯蚓为例，每日给仔猪加喂 159g 蚯蚓，15 天后比对照猪增重 90.3%；用以喂蛋鸡，每只鸡年产蛋量增加 1.5kg；喂蛋鸭，产蛋量提高 50%，每只蛋可增重 15g。

3) 减耗环。通过引入一个新的环节或增大一个已有的环节 ，从而减少生产耗损，增加系统生产力，食物链中这样的环节称为减耗环。例如，在棉花、麦、蔬菜等农作物上，常发生蚜虫危害，如果人工引进蚜虫天敌，就可以大大抑制蚜虫的繁殖危害，减少损失。人工放养和招引林木害虫(害兽)天敌的方法，可以取得成本低而又不会造成环境污染的最佳效益。利用人工巢招引益鸟抑制森林害虫，人工放养寄生蜂防治松毛虫等都是食物链原理的有利利用实例。我国古代就有放养黄柑蚁(蚂蚁)，控制柑橘虫害的记载。近年山东日照县用人工放养灰喜鹊，消灭松毛虫和林间害虫取得了明显效果。人工饲养草蛉虫，放入棉田、果园、菜园防治棉铃虫、蚜虫等，也已取得显著效果。

4) 复合环。是指具有两种以上功能的环节。复合环的加入把几个食物链串联在一起，增加系统产出，提高系统效能。如沼气池以畜禽粪便、秸秆、杂草等为原料，利用微生物(甲烷菌和产酸菌)把淀粉、蛋白质等高分子有机物降解为可溶性碳、氮化合物，同时产生甲烷等可燃性气体。这样，沼气为人们提供生活、生产能源，能效是秸秆直接燃烧的 6 倍；另一方面，沼液和沼渣可供多条食物链利用，如肥农田、果树，沼渣种蘑菇、养蚯蚓等。因此，沼气池是一个优良的复合环，成为复合农业生态系统中的“纽带”。又如稻田养鱼或养鸭，既可除虫灭草，又可增肥松土；既增产稻谷，又增产鱼和鸭蛋，具有多种效益。

2. 产品加工环类型

严格地说，产品加工环不属于食物链范畴，但与系统关系密切，能直接决定本系统的功能。在实际的农业生产中，常常忽略了农副产品的加工增值方面，致使农业生产效益较低。其实，农副产品加工环是农业生产过程中一个很重要的组成部分，是农业

生态系统物质循环、能量流动合理导向的重要环节，在农业生态系统中具有重要的作用。通过连上加工这一环节，可减少农业生态系统物质和能量的损失，减少系统外有机物质的富集，提高农业产品的效益。产品加工环有3种类型：

1）传统加工型。将农副产品加工成半成品出售。如利用低价值材料(竹类、麦秸、枝条、白蜡条等)编织成篮、筐、箩、席、包装箱等。

2）多次加工型。将初次加工利用后的剩余物进行二次利用，三次利用。如福建省某县纺织器材厂利用的原材料主要是森林采伐后的剩余物——枝桠材。首先将枝桠材加工成纺织工业上用的绕塔筒粗胚，再进一步加工成为绕塔筒成品；加工过程中的废料(木屑)用做培养香菇和白木耳，形成以下的生产环节：

森林资源→枝桠材→绕塔筒粗胚→绕塔筒、香菇和白木耳原料。

3）农工商结合型。即把农业(农、林、牧、渔)、加工业、销售紧密结合成一体。如江苏省大丰县根据该县棉花、蚕桑、大麦、林产品、水产品等的农业资源优势，正在实施农工商一体化生产模式：

棉花生产—轧花—粗加工—油脂及油脂加工—纺织—印染—服装；

蚕桑基地—丝—丝织—印染—丝织品；

大麦基地—麦芽—酿酒(啤酒)—饲料—畜禽—肉类加工—毛皮加工；

林产品、木材加工—人造板—家具；

水产品—冷冻—加工—罐头制品。

大丰县以农业生产为基础，立足本地资源，重点发展农副产品加工业，建设生态型工业示范体系，实现了工农业之间的良性循环。

在食物链加环时应注意以下问题：

1）食物链加环并非越长越好，关键是要尽早从链条中获取更多的产品。十分之一法则证明，链条越长，营养级层次越多，沿食物链损耗的能量也就越多。而且太长、太复杂的食物链在实际应用中也有许多技术与经济方面的困难。

2）食物链加环要讲究综合效益。不同食物链类型在社会效益、经济效益、生态效益方面的表现不同。比如，目的在于净化环境的食物链，可能具有较高的生态环境效益，但经济效益不一定高；目的在于实现废弃物资源化的食物链，可能具有较高的蛋白质利用效率，但不一定具有较高的能量转化效率。因此，加环应结合当时、当地的具体情况进行。

第四节　农业生态系统的功能

生态系统是由有生命的物质和无生命的环境所构成的统一整体。在生态系统中，由于生物与生物、生物与环境之间不断进行物质循环(简称物流)和能量转化(简称能流)，不但使得生物得以维持生存、繁衍与发展，而且也使得生态系统保持平衡与稳定。因此可以说，在有机体的生命活动过程中，无不贯穿着物质、能量和信息的有组织、有秩序的流动。生态系统中的物质循环与能量流动是生态系统的基本功能，是地球上生命赖以生存和发展的基础。研究和应用物质循环与能量流动的规律，是发展农业生产、保护

与改善农业生态环境的基础。

一、农业生态系统的能量流动

能量是物质运动的动力，是生态系统的动力基础，生命活动过程都存在着能量的流动和转化。热力学第一定律认为能量可以在不同的介质中被传递，在不同形式间被转换，但是能量既不能被创造，也不能被消灭，能量在转换过程中是守恒的。热力学第二定律指出能量的传递均有一定方向，而且任何的能量转换，其效率不可能达到 100%。即一个封闭系统内的能量传递和转化过程中，除了一部分可以继续传递和作为做功的能量(自由能)外，总有一部分不能传递和做功，而以热的形式消散。

生命的各种表现形式都是和能量分不开的，生命的本质就是生长、自我繁殖和物质合成等这些变化过程的连续，没有伴随着这些所有变化的能量转化，就不可能有生命和生态系统。生物与生物、生物与环境之间的能量传递和转化，就是生态系统的能量流动(energy flowing)。农业生态系统中的能量流动服从于热力学定律。

太阳能是农业生态系统中能量的最主要来源。除太阳能外，农业生态系统还有其他形式的自然能量，如风能、潮汐能、地热能、水流能、降雨能等，这些能量对食物链能量的转化与传递起辅助作用，称为生态系统的自然辅助能(natural auxiliary energy)。在农业生态系统等人工和人工驯化生态系统中，人们还通过投入人力、畜力、燃料、电力、机械、肥(饲)料、农(兽)药、农用薄膜等，辅助生态系统以太阳能为起点的食物链能量转化，称为生态系统的人工辅助能(artificial auxiliary energy)。辅助能主要通过改善农业生态系统中的一些限制因子，改善农业生态系统机能，从而提高农业生产力。生态系统能量转化利用效率和能量产出量的高低也直接与辅助能的质量及其投入管理水平的高低有关，因此要根据资源条件，合理使用辅助能，充分利用各种辅助能，维持和促进农业的持续发展。

二、农业生态系统的物质循环

生命的维持不但需要能量，而且必须从周围环境中吸收各种营养物质。农业生态系统中的物质主要由地球供应。农业生态系统是由无机环境和生命有机体构成的一个物质实体，物质在有机体和生态系统的发生与演化过程中起着双重作用，它既是用以维持生命活动的物质基础，又是能量的载体。农业生态系统中的生产者从土壤中吸收水分和矿物质营养，从空气中吸收二氧化碳，利用日光能制造各种有机物，沿着食物链转移到另一种生物体中，在转移中一般均有损失，被损失的物质又返回环境重新为植物所利用，因而物质是可以循环的。能量流动和物质循环(cycle of material)是任何生态系统中的两个基本过程，正常的能量流动和物质循环使农业生态系统各个营养级之间和各种成分之间组成一个完整的功能单位，可以保持生态的平衡和系统的稳定。

自然界包含着许多生物所必需的无机和有机物质，除了水和空气以外，还包括氮、氢、氧、碳等构成有机体的能量元素，包括钙、镁、磷、钾、钠、硫等大量元素，也包括铜、锌、锰、硼、钼、钴、铁、氟、碘等微量元素，其中最重要的是碳、氢、氧、氮

和磷 5 种元素，它们占全部原生质的 97%以上。所有这些元素称为生物性元素，在生物的生命过程中是不可缺少的，缺乏其中一种都会造成生物生长发育不良，甚至生命终止(表 3-1)。

表 3-1　植物必需营养元素的功能

元素种类	功　　能
碳	组成有机物质的主要元素之一
氢	组成有机物质的主要元素之一
氧	组成有机物质的主要元素之一
氮	组成蛋白质和原生质的重要成分，也是合成叶绿素的必要元素
磷	组成细胞核的一种成分，存在于磷脂、植素和核酸等化合物中，对细胞分裂和分生组织的发展是必需的。对糖类的形成与转化，脂肪和蛋白质的形成也很重要
钾	调节细胞胶体的理化特性。对光合作用、糖类形成和运转、蛋白质形成等都有一定的促进作用，但钾本身不是有机物的重要组分
钙	调解细胞胶体的理化特性。调节植物体内的酸碱反应，保持各种养分离子的生理，也是细胞壁的组成成分；对植物生长过程中的顶端伸展和芽的形成也是必需的
镁	组成叶绿素的成分之一；对植物的生命活动起着调节作用，也参与某些酶的反应。大多数存在于幼嫩组织中
硫	组成蛋白质的元素之一；在叶绿素的合成和加速根的发展中起着调节作用；对植物体内的氧化还原过程有作用
铁	在叶绿素的合成过程中有促进作用，但不是叶绿素的组成成分。对植物体内的氧化还原过程有作用
硼	改善根部氧的供应，提高根部吸收能力；对植物的开花结实有促进作用
铜	参与植物体内的氧化还原作用；提高植物的呼吸强度
锌	调解植物体内的氧化还原过程；在植物生长素的形成过程中有重要作用，是一些胱氢酶、蛋白酶和酚酞的组成成分
锰	在光合作用中有重要作用；在硝酸还原过程中是催化剂；在植物体内糖分的积累和转运上也起重要作用
钼	是硝酸还原酶的组成部分，对豆科植物的固氮有重要作用
氯	与糖类的代谢和合成有关
硅	增加细胞壁的强度，提高根系的氧化能力

三、农业生态系统的信息传递

信息传递是生态系统的重要功能之一，它在维持生态系统平衡，促进系统进化与发育，调节、控制系统内物流和能流等方面起重要的作用。在生态系统中充满着各种各样的信息，可以说生态系统既是创造信息的信源，也是传递和接受信息的信宿，时刻存在着信息流动，同时也是一个由多种信源、信道、信宿共同组成的多层次、多渠道复杂的信息系统。

信息是在某种作用下，物体所显示出的种种状态。因信息产生机理、形式、作用不同，可将信息分为物理信息、化学信息、营养信息和行为信息。

(一) 物 理 信 息

所谓物理信息指由物理因素引起的生物之间或生物与非生物之间的相互作用所产生的信息，其特点是存在范围广，作用大，直观而易捕获。

光信息在农业生态系统中的应用：光既是农业生产的必需条件之一，也是外界输入

系统的一种信息。生态系统中的生物在漫长的进化过程中，形成了与其生存环境相适应的光周期特性，从而直接控制着自身的生长、发育和繁殖。无疑，在农业实践中可以利用光信息作用来调节控制生物的生长、发育和演变过程，以达到我们的预期目的。例如利用各种植物的光周期特性和收获经济器官的不同，通过人工控制光周期达到高产早熟及延长或提早花卉植物的开花期，以便提高其观赏价值和商品价值。在育种上利用光照处理调节不同光周期植物，使其在同一时期开花进行杂交，培育优良品种。根据各种昆虫的趋光性特点进行诱捕，达到减少虫害的目的，不同昆虫对不同波长光的反应不同， 要具体情况具体分析。养鸡在保证营养供应基础上，可以通过控制光照时间提高鸡的产蛋率。

声、磁、辐射在农业生态系统中的作用：声、磁、辐射在系统中具有信息作用。大量实践证明，用一定频率的声波、磁场、辐射处理谷物、蔬菜作物及树木等种子，可提高其发芽率，获得高产，例如，随着航天工业的迅速发展将作物种子带人太空，经过在宇宙环境条件下宇宙辐射的特殊处理，可使蔬菜、水稻等大幅度提高产量。

(二) 化 学 信 息

化学信息是通过分子作用而引起的信息传递作用，在生物的生理代谢、行为支配上有着十分重要的意义。能起到信息作用的化学物质种类很多，如维生素、抗生素、激素等。目前已知结构的物质多为次生代谢物，约为 3 万余种，主要是生物碱、萜类、黄酮类、非蛋白质有毒氨基酸及各种甙类、芳香族化合物等。次生代谢物在植物和草食动物之间的信息传递表现为威慑作用、吸引作用和激素作用等。在农业生态系统中，生物行为常常是在某种化学物质的引诱和刺激下进行的，譬如：在农业生产中有人采用性外激素或者人工合成的性激素，诱杀害虫或阻止害虫的繁殖获得良好的效果；也有利用装有性激素的诱捕器来捕获害虫，预测、预报短期害虫发生的时期和范围，为预防害虫大面积发生提供依据。

(三) 营 养 信 息

营养信息是由外界营养物质数量的变化而导致生理代谢变化产生的一类信息，这类信息通过食物链传递或生物体营养状况及生物种群繁殖等表现出来。营养信息在生物体内的传递或生物个体之间、种群之间的传递过程中直接影响着生物的生长、发育、繁殖及迁聚，具有一定的调控作用。例如，禽类动物长期饲用缺钙食物后，会因缺钙而导致卵壳软化、孵化率下降、减少种群繁殖等。在果树管理上，常采用环割技术来调节果树体内的营养分布，阻止营养物质的下移，可以促进果树花芽的形成，提高产量。

(四) 行 为 信 息

所谓行为信息是生态系统中各种生物，尤其是动物以某种特殊行为表现出的一类信

息，这类信息产生机理复杂多变，形式多样，因不同种群而各具特色。其传递方式也因生物种类的不同而多种多样，有的以化学信息传递，有的以物理信息传递，如：当某农田出现大量田鼠时会引诱大量猫头鹰群聚于此地，获得丰厚的食物；当田鼠数量减少直至不能满足猫头鹰的消费时，猫头鹰又离去找新的食物源。

总之，农业生态系统之所以能不断地发展下去，也正是由于系统中存在着这种纵横交错、错综复杂、相互作用、流动不息的信息流，并自发调节、控制、支配着生态系统中的物质流、能量流，使系统中物质和能量在有序地流动，并使系统的平衡、稳定和发展得以实现。

第五节 生态农业

生态农业(ecological agriculture)是运用生态学、生态经济学原理及系统工程理论，集传统农业技术精华与现代农业高新技术为一体，组织和发展起来的一种新型农业生产体系。

我国的生态农业是在适应我国国情的基础上产生的农业可持续发展的新模式。作为一种新的农业生产方式，它体现了生态与经济相互协调的可持续发展战略，是一项农民自发创造、政府积极支持、科技人员主动参与的伟大实践。

我国的生态农业在实践上已被广泛认为是成功的持续农业模式。我国生态农业从开始研究试验时就在检讨常规“现代化农业”的基础上，注意合理继承发扬我国传统“有机农业”的精髓，批判地吸收国外不同的可持续发展农业模式的科学内涵，把保护农业生态环境、促进投入合理化和实现“资源合理、永续利用”作为研究的基本目标。可以说，我国生态农业就是要把最新的生态学、生态经济学、环境科学和农学等知识综合应用到农业和农村发展中的一种系统工程，或者说是一种新型的知识化农业经济体系(模式)，是当前“知识经济”大潮在农业领域的体现。

我国约 20 年的生态农业实际走的是一条专家、农业管理者和农民相结合的道路，已初步创建了国家支持的 51 个生态农业试点县、约 150 个省级支持的生态农业试点县，还有近 2000 个其他规模的试点(包括户、场、村、乡等)。各种试点一致反映，已经收到了发展农村经济、较好保护和建设农业生态环境、增强农业发展后劲的效果。生态农业试验很好地配合了国家关于提倡发展“三高农业”、建设基本农田、繁荣农村经济和开拓农村就业门路、推进农业产业化等农业和农村工作政策，同时也是农业上贯彻“21 世纪议程”和国家环境保护规划目标的有力措施。

一、世界可持续农业

世界农业经历了从原始农业、传统农业到现代农业的发展历程，各国的农业生产水平和发展模式产生了明显的分化。第二次世界大战以后，西方发达国家相继进入农业现代化阶段，高投入、高产出的现代农业依靠石油动力机械，投入大量的农药和化肥，创造了农业增产的奇迹，但紧随而来的是土壤侵蚀、环境破坏、病虫害爆发及资源破坏等一系列生态灾难。无独有偶，20 世纪 60 年代，发展中国家在从传统农业向现代农业过

渡过程中，广泛开展的绿色革命运动，通过改良作物品种，增加化肥、农药的投入，亦使广大发展中国家受益匪浅，但绿色革命在带来增产效益的同时，也带来了诸如土壤板结、肥力下降及单一品种的耕作制度对病虫害抵御能力低等农业生态问题。无论是发达国家的“石油农业”，还是发展中国家的“绿色革命”都不能摆脱农业生态环境恶化这一现实，使得人们开始重新审视现代农业发展模式，并引发了全球农业可持续性的思考。

1981 年，美国农业科学家莱斯特·布朗在其著作中系统阐述了“可持续发展观”，是对农业可持续性的较早思考；1984 年，哥尔丹·道格拉斯在其书中明确提出了“农业可持续性”问题。农业可持续发展一经提出就得到国际社会的响应，1987 年世界环境与发展委员会(WCED)提出了“2000 年转向持续农业的全球政策”；1988 年，联合国粮农组织(FAO)制订了“持续农业生产：对国际农业研究的要求”的文件；1991 年，FAO 在荷兰的丹波召开的农业与环境国际会议，发表了著名的“丹波宣言”，拟定了关于农业和农村持续发展的行动纲领；1992 年 WCED 在巴西召开的环境与发展会议上通过了著名的《21 世纪议程》，将农业与农村的可持续发展作为可持续发展的根本保证和优先领域，写入第 14 章。自此，农业可持续发展不仅成为一种农业发展的新思潮达成全球的共识，而且也得到了最高级别的政治承诺，这使农业可持续发展在世界范围内开展成为可能。

农业可持续发展思想虽在世界范围内得到广泛传播，但由于各国国情不同，对其理解有异。发达国家由于生产力水平相对较高，其农业功能已扩展到环境美化，食物生产以质量目标为主，并重视食品安全与营养，因而更多地强调资源环境保护，这是一种农业现代化后的思路。而对于大多数发展中国家而言，农业投入水平低，经营粗放，农产品从数量上还满足不了消费需求，因而注意力更多地集中于数量增长，希望通过发展，以求解决温饱，所追求的是以发展为主要目标，同时兼顾环境保护的策略。发达国家和发展中国家所追求的共同点是合理开发资源和保护环境，促使农业可持续发展。因此，各国在实施可持续农业发展模式上也有很大的差别。

20 世纪 80 年代以来，发达国家开始探索替代“石油农业”的新农业发展模式。美国首先提出农场外部的生产投入(化肥、农药等)；80 年代末，又转向“高效率可持续农业”发展模式，强调农业生产以高效率为核心，依靠科技进步与教育，提高农产品的质量，增加农业纯收入，不盲目追求最高产量，尤其是无利可图的产量。德国则倡导“综合农业”发展模式，综合处理发展与生态系统、土壤肥料、水资源保护的关系及加强自然资源的管理。日本提出了“环境保全型可持续农业”发展模式，强调维护生态平衡和环境保护系统及农村经济发展的关系。法国设计和推行了“环境保护型可持续农业”发展模式，提高施肥和病虫害的防治效率，减轻农业对环境的负面影响，推进有机物资源的再利用，加强环保型农业技术的研究开发。与发达国家相比，发展中国家可持续农业发展明显滞后，除中国外，很少提出有代表性的可持续农业发展模式。

(一) 发达国家可持续农业发展的技术理念

发达国家可持续农业的发展模式有别于常规农业模式，主要体现在其技术理念的差异上，各国所实施的可持续农业发展模式所依据的技术理念可以概括为以下几种：

1. 有机农业

这是由英美学者在 20 世纪 30 年代提出的基于生态系统原理的基础上发展起来的可持续农业技术理念，80 年代在发达国家开始付诸实践。它强调尽量减少使用农场以外的物质投入，并完全停用各种化学合成物质，通过轮作、间作和各种生物防治方法来控制杂草和病虫害，养分则主要来自于轮作中的豆科植物、秸秆还田、粪肥、垃圾及其他有机物。这种农业技术理念尽管有别于常规农业，但它与自然生态系统仍有本质的区别。它是由单一种群构成的人工农业生态系统，缺乏多样性，需要劳动力和资金的投入，并靠人来维系其稳定性，且作物产量较低，缺乏经济效益，即使是发达国家目前采用者亦较少。

2. 持久农业

20 世纪 70 年代由澳大利亚学者提出，亦成为发达国家可持续农业的技术理念之一。它是对农业生态系统有意识的设计和维持，根据当地的物种与自然环境特点，设计包括乔木、灌木、草场、农作物、散养家禽等成分的一个完整的生态系统。这种生态系统具有多样性，群落和系统具有自我演化潜力，因而具有稳定性。各系统成分充分利用各自的系统位置，使物质循环和能量流动畅通，系统物质自给；不需要各种化学物质来消除病虫害和补充肥力。对系统中某一物种的单位产量来说，可能较常规农业方式为低，但系统中有多种动植物存在，它们一起表现在单位面积上的总产量可能高于单一作物的产量。这样，伴随现代常规农业方式而来的环境污染、高投入、高消耗及自然肥力衰退等生态危机问题都可以有效地得到避免。它的生态效益高于经济效益，在西方自然保护主义者中盛行。

3. 精准农业

精准农业也有人叫精确农业，是在现代信息技术、生物技术、工程技术等一系列高新技术最新成就的基础上发展起来的一种重要的现代农业生产形式，其核心技术是地理信息系统、全球定位系统、遥感技术和计算机自动控制技术。精准农业系统是一个综合性很强的复杂系统，是实现农业低耗、高效、优质、安全的重要途径，是 20 世纪 90 年代可持续农业技术发展的新方向。改变大面积、大群体平均投入的资源浪费型做法，在获取农田小区作物产量和影响作物生产的环境因素(如土壤结构、植物营养、含水量、病虫害等)实际存在的空间和时间差异性信息的基础上，分析影响小区产量差异的原因，区别对待，按需实施，定位调控。它既强调降低农业的外部投入，又不排斥外部投入，不追求最大生产能力和最高产量，而是以提高资源利用效率，降低生产成本和减小环境污染风险为目标。显然，精准农业实施的重要前提是依靠现代化高科技手段的支持及高的资本投入，这也是目前它只能在科技水平较高的少数发达国家实施的原因。

上述三种持续农业的技术思想代表了发达国家不同阶段的可持续农业技术理念，体现了可持续农业技术的应用与生产力水平和科技进步休戚相关的关系。其中精准农业依靠现代科技手段，通过精确地控制投入，实现稳产高效与节约资源、保护环境并存，它代表了世界可持续农业的发展方向。

与发达国家多样化的可持续农业发展模式和各种技术理念相比，发展中国家可持续农业模式及技术理念相对滞后，而发达国家的技术模式明显的倾向是重视环境、淡化发展，或者是使用发展中国家所不具备的技术手段，因而无益于发展中国家的可持续农业发展。鉴于此，1996 年 FAO 在罗马召开的世界粮食首脑会议上，针对缺乏适合发展中国家实施的农业可持续发展的技术理念，提出了发展中国家可持续农业发展的技术和要点，并以“绿色革命的教训，迈向新的绿色革命”为题对新旧绿色革命进行比较，突现了“新的绿色革命技术”，指出包括改良新品种、化肥、灌溉和农药技术等对可持续农业发展的意义和作用。新绿色革命为发展中国家的可持续农业发展指明了方向。

二、中国的生态农业

自改革开放以来，中国的沿海地区得到了前所未有的发展，但是内陆地区因为条件差，大部分地方仍然是落后的农村，有待发展。中国要达到可持续发展的理想，农村发展便是其中一项首要的任务。农村要发展，当中存在很多困难，例如，人口基数大且增长快、教育水平低、土地短缺、环境退化、水资源短缺、能源短缺、污染和经济疲软等问题。这些困难在生态脆弱的地区尤为突出。有学者认为解决的方法是系统地发展具有中国特色的生态农业建设。

所谓生态农业建设，就是将农村看做一个“社会—经济—环境”的复合生态系统。这个生态系统是利用生态经济学原理及系统工程学方法进行农业规划、设计和管理，在一个总体规划协调的原则下，依据当地生态经济条件，实现物质、能量高效利用，经济发展，技术发达，体制合理，管理先进，社会文明，自然环境优美的现代化新农村。通过生态农业建设，在解决温饱和脱贫致富的同时，避免经济与社会发展进程中出现不必要的波折，使自然资源得到合理开发与利用，减少对环境的污染与破坏，寻求农村经济持续、稳定、协调发展，以取得社会、经济和生态环境效益的统一。图 3-3 所示是一个典型的中国生态农业建设的运作方式。

中国作为发展中国家，20 世纪 80 年代初就提出了可持续农业发展模式，即生态农业发展模式。1993 年 12 月，中国农业部与国家计委、国家科委、财政部、水利部、林业部和国家环保局共 7 个部委订立了“立足示范、着眼推广、注重基础、讲求效益”为农村发展原则。根据这一原则，自 1993~1997 年这 4 年间，国务院共组织协调有关省、市和自治区进行了 50 个生态农业试点的建设工作，试点面积达 120 000km^2，占中国国土面积约 1.25%。在这 50 个生态农业试点的带动下，中国的生态农业进入一个前所未有的发展阶段。

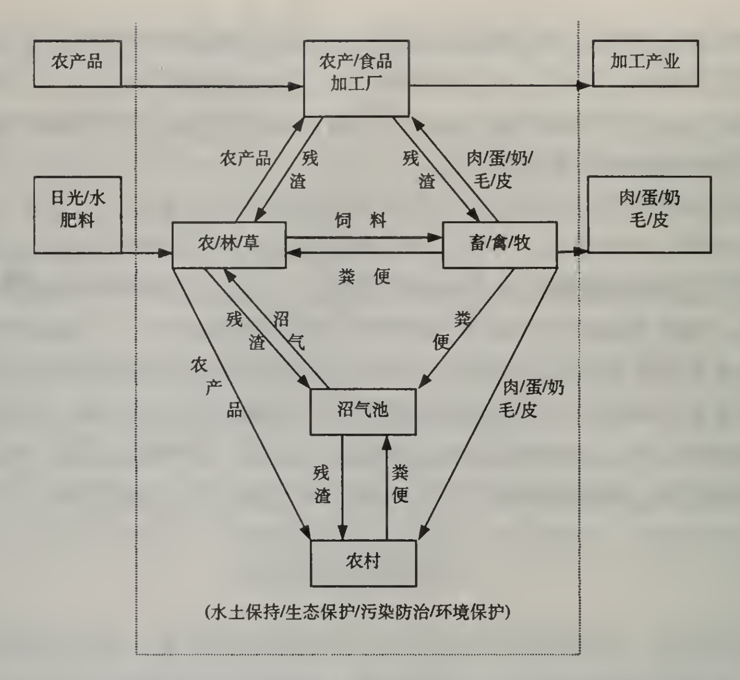


图 3-3 典型的中国生态农业建设的运作方式(引自伍世良等 2001)

(一) 中国生态农业理念的特征

“生态农业”一词虽源自于西方，但中国生态农业(Chinese ecological agriculture)却有着不同于西方的特点。中国的生态农业理念是借用西方生态农业的名词，吸收中国传统农业思想精华，并结合现代农业科学技术而形成的具有中国特色的可持续农业发展模式。它是遵循自然规律和经济规律，以生态学和生态经济学原理为指导，以生态、经济、社会三大效益协调为目标，运用系统工程方法和现代科学技术建立的具有生态与经济良性循环、持续发展的多层次、多结构、多功能的综合农业生产体系，是较为完整的可持续农业理论与技术体系。中国的生态农业发展理念的主要特征有：

1) 中国的生态农业是从系统的思想出发，重视系统整体的功能，把农业生态系统和生产经济系统内部各要素按照生态经济学的基本原理进行调控，并运用系统工程方法建立起综合的农业发展模式。

2) 中国的生态农业强调经济效益，要求农、林、牧、副、渔各业组成综合经营体系，追求高的农业生产收入；同时不排除资本和农业生产资料的大量投入，尤其是化肥和农药的投入，但强调尽量运用生物学方法来施肥和进行病虫害防治。

3) 中国的生态农业包含有较为完整的生态过程，其生态效益是通过对生态过程的驾驭来实现的。即初级生产者(绿色作物)、第二级生产者(各种动物)和分解者(微生物)并存，通过人为设计，采取有效的措施，使水、热、光、气候与土壤等自然资源及生产过程中的各种副产品和废弃物得以多层次、多途径的合理利用，理顺各级生产者之间的关系来实现生态效益目标。

(二) 中国生态农业的特点

在近 20 年的发展过程中，中国的生态农业在吸收国外可持续发展农业经验的基础上，结合中国传统农业中优秀的技术成果，走出了一条具有中国特色的生态农业发展道路。经过不断的摸索与创新，中国的生态农业形成了以下几个特点：

1) 以追求高产、优质、高效为目的。除了保护生态环境和维持农业的可持续发展外，我国的生态农业强调必须产量最高、质量最好、效益最佳，这一点和国外的各种替代农业不同。发达国家的农业现代化水平很高，农产品大量过剩，增产粮食不再是主要目标，现在的主要矛盾是如何控制粮食生产，所以重点不是增产与发展，而是将注意力集中在资源与环境的保护上。我国的农业生产，必须坚持高产优质，这是由我国的国情所决定的：① 人多地少且人口增加快，耕地减少迅速，地力下降，农副产品人均占有量较低。据预计，到 2030 年我国人口将达到 15 亿~16 亿，而我国耕地只有不到 1.3 亿 hm^2，并且近 10 年来每年减少 25 万 hm^2，再就是土地质量下降，优质农田仅占 20%，中低产田占 70%；粮食总产量多，但人均水平低，不到 400kg。② 现代化建设的需要。现代化的农业，必须是高产高效的农业，人民物质生活水平的提高需要更多的农副产品，这一点在有限的土地资源上，只有提高产量才能达到。③ 农业发展现状的需求。我国的农业正处在由传统农业向现代农业的转型期，既需要有较高的生产力，同时又要避开走资源枯竭、环境污染的老路。

2) 传统农业的精华和现代科学技术相结合。我国的生态农业模式源远流长，有些生态农业模式很早就已出现，而且至今仍兴盛不衰。例如稻田养鱼、桑基鱼塘，都已有上千年的历史。当代的生物技术、生态技术、化学技术、机械技术，以及软科学技术，在生态工程中常与传统技术结合运用，不但易于被农民接受，而且更适合我国农业生产条件复杂和劳动力资源丰富的特点。

3) 强调物质的适当投入。生态农业是一个复杂的开放的经人工驯化的生态系统。耗散结构理论认为，开放系统要得以维持和发展，必须不断输入物质和能量。生态农业系统仅仅依靠其自身的物质和能量循环过程往往难以维持整个高产出系统的持续发展，特别是在系统受到巨大干扰的时候，如病虫害大规模发生时，仅依靠自身的防御能力难以维持，必须由外界输入必要的物质和能量，但生态农业注意物质投入的合理的量，避免过量投入的副作用。

4) 劳力密集型和技术密集型相结合。我国人口众多，特别是农村劳动力丰富，发展生态农业必须充分运用这一有利条件。发展劳动力密集型农业，配以精湛的农业工艺和农业生态工程技术，往往使我国某些地区在人均只有几分地的情况下出现丰衣足食的奇迹。

5) 个别农场发展与区域发展相结合。我国生态农业强调从促进区域整体可持续发展的角度出发，以生态户、生态村、生态乡(镇)、生态县，甚至生态市、生态省为单元，进行不同等级区域的生态建设，这样，就将农户、农场的发展与整个区域的发展紧密地结合起来，相互促进，共同发展，因而具有旺盛的生命力，得到了广大农户和各级政府的大力支持，发展迅速。国外的替代农业，基本上都是个别农场主，特别是小农场

主，在自己农场的试验，很难得到政府的支持。

（三）中国生态农业的类型

中国的生态农业有鲜明的地方特色，中国地域辽阔，自然条件复杂多样，适应不同地域特色，发展了不同技术特点的生态农业类型，包括：

1）立体复合型。利用生物群落内各层生物的不同生态位特性及互利共生关系，分层利用自然资源，以达到充分利用空间，提高生态系统光能利用率和土地生产力，增加物质生产的目的。这是一个在空间上多层次，在时间上多序列的产业结构，种植业中的间混套作、稻鱼共生，经济林中乔灌草结合及池塘水体中的立体多层次放养等均是这种类型。

2）物质循环型。模拟生态系统的食物链结构，在生态系统中建立物质的良性循环多级利用链条，一个系统排放的废物是另一个系统的投入物，废物可以循环利用，在系统内形成一种稳定的物质良性循环，达到充分利用资源、获得最大经济效益的目的，同时有效地防止了废弃物对环境的污染。

3）生态环境综合治理型。采用生物措施和工程措施相结合的方法来综合治理诸如水土流失、盐碱化、沙漠化等生态恶化环境，通过植树造林、改良土壤、兴修水利、农田基本建设等，并配合模拟自然顶极群落的方式，实行乔、灌、草结合，建立多层次、多年生、多品种的复合群落生物措施，是生物技术与工程技术的综合运用。

4）病虫害防治型。利用生物防治技术，选用抗病虫害品种，保护天敌、利用生物以虫或菌来防治病虫害，选择高效、低毒、低残留农药，改进施药技术等，保证农作物优质、高产、安全。

（四）中国生态农业发展趋势

在寻求环境与经济协调发展的时代，我国生态农业建设必将经历一个新的发展阶段，使之规模更大，效益更高，影响更加深远。其发展趋势主要表现为：

1）生态农业的理论研究将更加系统和进一步深化。随着生态农业建设规模的扩大，将会提出许多新的问题，需要做出理论上的概括和升华。生态农业的基本理论将会逐步形成完善的体系；生态农业的指标和评价方法将更加完善和成熟；生态经济系统内部规律将进一步配套完善。

2）生态农业建设规模将进一步扩大。生态农业建设单元规模主要进入生态农业县建设时期，实现生态农业由试点到规模发展的阶段性转变，一些地区开展生态农业地区建设，并出现生态农业地区典型。

3）生态农业的发展将带动绿色食品的发展，绿色食品将成为占有国内外市场的重点突破口。由于我国人民的生活水准正逐步从温饱向小康过渡，已有越来越多的人更加注重食品保健，再加上国外农产品市场对生态食品的要求，因此，无污染的绿色食品市场需求将会越来越大，生态农业的经济将大幅度提高，将会通过高出普通食品价格的绿

色食品而得以体现。

4) 现代高新技术会更加广泛地渗透于生态农业之中。由于生态农业所追求的目标是高效益和无污染，而要实现这个目标就必须更多地依靠现代高新技术。基因工程、发酵工程等最新微观工程技术及大规模生产的农业宏观生态工程技术也将首先被生态农业所利用。随着环保产业的进一步发展，一些环保新技术包括污水处理、土壤培肥、害虫综合防治、生物活性肥料等环保生态工程技术，也将广泛应用于生态农业。这些现代高新技术的使用，必将会更快地促进生态农业的发展。

5) 生态农业建设中的各种自然资源的开发、利用、培育与国家持续发展总体战略相一致。

6) 生态农业的发展将进一步和整个农村环境的综合整治，如乡镇企业的污染防治、农村能源建设、生物多样性保护、各种农业资源的合理利用等紧密结合。生态农业将带动区域性景观生态建设，改善整个区域的生态环境。

7) 生态农业组织实施形式上将纳入国民经济和社会发展计划，以要求各个部门紧密配合，促进生态农业的全面发展。

8) 生态农业的经济目标与国家倡导的高产、优质、高效农业相吻合。

9) 生态农业的社会效益直接服务于吸收农村剩余劳动力就业，加快农民生活由温饱迈向小康的步伐和社会主义新农村建设。生态农业与乡镇企业将成为我国农村经济发展的两大支柱。

10) 生态农业的国际交流、国际影响将进一步扩大，特别在发展中国家将产生良好的影响。因发展中国家多数是人口多资源相对不足，而且处于生态环境恶化之中，发展生态农业是这些国家摆脱困境，经济和环境协调发展的正确途径。

三、生态农业的技术支撑体系

经济发展离不开科学技术，科学技术进步是提高经济增长质量、实现可持续发展的根本途径。因此，建立有利于农业可持续发展的农业生态技术(agricultural ecotechnique)及其创新体系具有十分重要的现实意义。

(一) 生态农业的关键技术支撑体系

生态农业是一种可持续发展农业，其关键技术体系主要涉及农业和经济、社会发展中带有全局性、关键性、方向性的系列重大技术。大致包括：① 优质、高产、高抗性农业品种的繁育及其高效种养技术；② 农业资源的高效利用技术；③ 传统产业的更新改造技术；④ 生态农业与绿色食品生产技术；⑤ 农产品贮藏、保鲜与深加工技术；⑥ 农业废弃物的资源化利用技术；⑦ 农村生态环境建设与保护技术等。

1) 高效耕作栽培技术体系。主要包括合理轮作、间作套种与多熟制栽培、免耕和最少耕作、覆盖栽培、宿根栽培与再生栽培，梯田与丘陵坡地水土保持耕作技术等。

2) 土壤管理技术体系。主要包括化肥与有机肥配合施用，科学配方施肥，氮肥深施，堆肥、厩肥、绿肥与垃圾的利用，豆科作物的有效配置，非豆科作物的固氮及其他

新兴替代肥源(如控释肥、缓释肥、生物肥料等)的开发利用等技术。

3) 水管理技术体系。主要包括喷灌、滴灌、渗灌等先进节水农业技术的扩大利用，蓄水保墒技术的改进，地表覆盖技术，用化学方法控制作物气孔减少蒸腾技术等。

4) 病虫害综合防治技术体系。主要包括选育抗病虫品种，科学施用农药，开发综合防治，扩大生物防治(天敌、微生物农药等)、植物杀虫剂、害虫雄性不育技术、性引诱激素的应用，适期育苗移栽、抗杂草作物选用与配置等。

5) 改善作物栽培环境的技术体系。主要包括农林复合种植技术、农田防护林带配置技术、立体种植技术、设施农业技术等。

6) 提高光合作用效率的技术体系。主要包括高光效育种，叶片直立型等株型结构的改造，C_4作物资源的扩大利用，设施栽培的二氧化碳补给，生长激素、塑料覆盖等技术的利用等。

7) 生态林营造技术和观光林建设技术体系。包括劣质林地林相改造技术和乡土树种树木园建设技术、生态公益林营造技术、速生丰产林建设技术、工业区和居民区抗逆性人工植物景观林建设技术等。

8) 畜禽优良品种的繁育、推广和原有品种的改良和提纯复壮技术体系。主要包括优质畜禽品种繁育与改良技术、规模化养殖技术、畜产品标准化与无害化生产技术等。

9) 畜牧、水产、食用菌的废弃物综合利用和污染控制技术体系。主要包括畜牧、 食用菌的废弃物生产无机、有机肥技术，节水、环保型的畜牧、水产养殖技术，畜牧、水产食用菌的废弃物综合处理与资源化利用技术等。

10) 健康食品生产技术体系。主要指配套的农业清洁生产技术，包括生物农药及其施用技术的开发、应用与推广，生物肥料的研发应用与推广，非激素类饲料添加剂的开发应用和推广等。

11) 农产品保鲜、加工技术体系。主要包括新鲜果蔬的保鲜与深加工技术，鱼、虾等水产品的运输、保活、保鲜技术，畜产品的保鲜与深加工技术等。

12) 生态环境保护和资源高效利用技术体系。主要包括水土流失控制技术、典型地段生物多样性保护技术、退化生态系统的恢复与重建技术、复合农林技术、环境污染治理与控制技术等。

13) 农业信息化技术体系。主要包括作物的生长模拟与可视化技术、农村的信息网络建设技术、农业环境资源的动态监测系统、农业专家系统技术、3S 技术的农业应用等。

14) 生态农业示范基地建设技术体系。主要包括生态农业基地和各种配套技术的组装集成、农业高新技术的示范推广、农业生产现代经营管理技术、城乡一体化技术等。

(二) 生态农业的高新技术创新体系

农业高新技术决定着人类未来的社会经济生活。据专家预测 21 世纪世界农业高新技术发展主要体现在以下 6 个方面。

1. 新物种塑造技术

主要通过生物技术、核技术、航天技术、光电技术和农业常规育种技术的结合，综合不同的优良性状，按人类需要有选择地定向塑造新的物种和类型，不断丰富生物多样性，提高生物抗逆性、作物品质和产量，并充分利用固氮微生物和藻类，丰富和充实作物营养综合体系的内涵。

2. 新快速繁育技术

利用植物细胞的全能性，通过无性繁殖途径，发展人工种子制造产业；利用胚胎移植的胚胎分割技术，发展动物胚胎生产、贮存、运输与利用的新兴产业；利用动物的生长激素基因转移技术、畜禽性别鉴定技术，进行畜禽的定向繁育和饲养。

3. 新农业工厂构建技术

21 世纪农业工厂化生产随着现代农业科学技术、计算机技术和材料科学等的发展和综合运用，将有长足发展，将实现人工创造环境、全过程自动化的种植和养殖，建立起技术高度密集的工厂化、自动化生产体系。

4. 新人造食品和饲料生产技术

主要包括开发单细胞蛋白资源，生产高蛋白饲料与食品；利用微生物发酵处理秸秆生产饲料，开发植物叶片资源，生产可用做饮料和食品添加剂的营养价值高、可消化率高的叶蛋白，利用生物技术培育新菌种，加快氨基酸发酵的利用，大规模生产不同用途的氨基酸等，将成为 21 世纪的农业新产品。

5. 新兴替代能源开发技术

面对能源短缺与危机，21 世纪利用生物发展新能源产业将成为可能。种植开发“绿色能源”，除薪炭林外，重点利用多年生和一年生植物及藻类，生产酒精和石油代用品。如用糖蜜发酵生产酒精；利用谷类生产乙醇和利用大量的作物秸秆来生产沼气、乙醇， 部分代替石油等。

6. 新的空间领域拓展技术

像对待地力一样提高“海力”，促进水产养殖增殖，向集约化、农牧化方向发展，营造“海洋农场”“海洋牧场”“海洋林场”，实现蓝色革命。同时，还可将航天科学与农业科技相结合，发展太空育种。近年来，我国把水稻、番茄的种子送入太空，发生了显著变异，如稻穗变长、籽粒变大、抗逆性增强等，这有助于加速品种选育进程，丰富种质资源。

四、生态农业技术

生态农业技术体系指使生态农业形成起来并使之有效运转的多项技术的有机组合。 中国生态农业的技术体系是从广大农民各种农业生产实践中，按生态农业的标准

加以筛选、总结而形成的，是从广大农业科技工作者的科技成果里按生态农业建设需要而采纳、改造和进一步发展的结果，也是在生态农业实践中，广大农民和科技工作者按照生态农业原理，积极开展生态农业设计和生态农业研究的成果。

（一）农业环境综合整治技术

中国的生态农业采用了生物措施与工程措施相结合的办法综合治理农业环境。这一方法已成功地用于治理华南和黄土高原的水土流失、治理华北黄淮海平原的盐碱地及西北沙漠化的防治方面。如山东省陵县张西楼村处于风沙大、盐碱重的黄淮海平原。在生态农业建设中，该村采用的工程措施是打浅井，开深沟，形成了 40 条长 30km 的排灌网，通过引黄河水、抽浅层地下水和利用雨水相结合，做到有灌有排，既压了碱又控制了地下水位。在生物措施方面，当地建造了人工防护林网；引种抗盐碱的紫花苜蓿、草木樨，用于发展畜牧业；种植压青绿肥增加土壤有机质；还建立起桐粮、桐棉、果粮、果棉等立体配置的植被结构。实施这些措施后，该村两年内使粮食增产4%，牲畜增长 42.9%，经济收入增加 36.8%。

（二）农业资源的保护与增殖技术

在中国的生态农业中广泛采用农业资源的保护与增殖技术，以保障耕地不衰退，森林能永续，河海鱼不尽，草原牛羊壮。

生物养地技术是中国传统农业中的精华之一。目前各地采用的方法包括：作物秸秆和动物粪便经过堆制、沤制或经养菇、制沼气之后回田做肥；实行养地作物和耕地作物的轮作间种；采集野生绿肥、食品加工副产物、河流沉积物等，增加有机肥投人。

为增殖森林资源，扩大森林的保护效应，我国已开展“三北”防护林建设、东南沿海防护林建设、长江中下游防护林建设等重大林业生态工程。各地生态农业建设中都把林业建设作为一项重大措施。全国森林赤字已从 1992 年起消灭。

渔业资源增殖包括在河流和近海放鱼苗、虾苗、蟹苗，在近海建立人工全礁等。

为防止草场资源退化，内蒙古呼伦贝尔草原的鄂温克旗首先严格核定草原载畜量，减轻过牧区载畜量，把过载牲口转移到未满载的林缘草甸和草甸草原。退化草场实施被动式的封滩育草和主动式的草库伦建设。在草库伦实行松耕、施肥、补播、灌溉等人工管理措施，加上灭鼠、灭霉草工作，基本上克服了草原的退化问题。

（三）小流域综合利用技术

小流域是指相当于由一条坳沟或河沟道为主体所构成的以分水岭和出口断面为界的一个独立而完整的自然集水区域，是山地和丘陵区的基本地貌组合单元。小流域综合治理就是以小流域为治理单元，合理规划与布置水土保持农耕技术措施、林草措施和工程措施，优化农、林、牧、副各业的用地结构，使各项技术措施互相协调、互相促进，形

成小流域综合治理技术体系，实现以水土流失控制为核心的生态、经济、社会效益相统一的综合治理目标。

(四) 立体种养技术

立体种养不仅在大田作物之间开发多熟种植和间种套作，而且包括利用木本果树、林木、热带作物、牧草甚至食用菌；立体种养也不限于植物，还包括动物，例如畜、禽、鱼类等。林地间人参、林地间药材、稻田养鱼、果园养菇、蔗地养菇、多层养鱼等都是立体种养的例子。立体种养技术是利用了物种间对资源利用的互补特性，利用了生物间生态位的差异，从而提高了整体对资源的利用率。

(五) 庭院资源综合利用技术

庭院区的土地离家庭最近，而且是家族能量、物质、资金的集散中心。在我国，人均耕地少，劳动力富余，充分利用家庭闲散劳力，可把庭院建设成智力和劳力集约，能量和物质投入、产出水平高，转化效率高的地段。

(六) 再生能源利用技术

在中国农村，能源问题仍比较突出。为了燃料问题，农民不但把原来可以做饲料与肥料的秸秆烧掉，而且还把村落附近的植被砍光。“燃料、饲料、肥料”的矛盾，酿成了生态环境的恶化和地力衰退。在我国生态农业建设中实施了一套再生能源利用技术，扭转了这种状况。再生能源利用中常用的技术包括建造薪炭林，推广太阳能热水器，建造沼气池和省柴灶等。

(七) 农业副产物再利用技术

农业中的作物秸秆和动物粪便等农业副产物在传统上多用做有机肥回田。在中国生态农业的实践中已运用了各种技术开辟了多种多样的利用途径。这些技术包括：利用牛粪、秸秆进行食用菌生产的技术；利用蔗渣、茶叶进行蚯蚓生产的技术；利用猪粪进行蝇蛆生产的技术；鸡粪、猪粪的饲料化技术；秸秆氨化技术；利用农业有机物的沼气制造技术。这些技术的配合使用有利于增加农业的经济收入，增强系统内部能量和物质利用效益和效率，有利于建立无废物的农业生产体系。

(八) 有害生物综合防治技术

在生态农业中，有害生物的综合防治(integrated pest management，IPM)正和无公害食品及绿色食品的生产联系起来。1966 年联合国粮农组织对有害生物综合治理下了如

下定义：“有害生物综合防治是一套治理系统，这个系统考虑到有害生物的种群动态及其有关环境，利用所有适当的方法与技术以尽可能互相配合的方式，来维持有害生物种群达到这样一个水平，即低于引起经济为害的水平。”1975 年在全国植保工作会议上，我国生态学家马世骏教授也为害虫治理下了一个定义：“从生物与环境关系的整体观出发，本着预防为主的指导思想和安全、有效、经济、简易的原则，因地因时制宜，合理运用农业的、生物的、化学的、物理的方法及其他有效的生态手段，把害虫控制在不足为害的水平，以达到保护人畜健康和增产的目的。”因此，预防是有害生物综合防治方针的基础，“综合防治”不应被看成仅仅是防治手段的多样化，更重要的是以生态学为基础，协调应用各种必要的手段，以经济、安全、有效地控制有害生物为目的，而不是以消灭有害生物为目的。任何防治有害生物的设计，如果脱离了这一指导思想，采用的措施再多，也不能算是好的综合防治。

五、生态农业的模式

生态农业建设的核心是从农业生态系统的视角出发，在大农业范畴内正确选择协调农业社会效益、经济效益和生态效益的农业模式，并以此为基础合理组配各项生产，协调各项技术，促进农业向高效和持续方向发展。

生态农业模式(ecological agriculture model)是在生态农业实践中形成的、结构相对稳定的农业生态系统。在近 10 年的生态农业实践中，各地涌现了一大批行之有效的模式，如基塘模式、庭院模式、林粮间作模式、节能改燃模式等。在生态农业蓬勃发展了一段时间之后，进一步认识区域环境与生态农业模式的关系对促进生态农业建设的健康发展是很重要的。

农业区域的环境特色可看成是气候土壤、流域地形、人口密度和城乡经济梯度四类环境梯度交叉作用的结果。在特定区域内要使生态农业建设获得成功，必然要充分利用有利的环境条件，有针对性地克服环境制约，进行农业生态系统结构与功能的组配。

我国地域辽阔，资源状况地区间差异很大，地形、地势交错复杂，社会、经济、技术条件参差不齐，发展水平悬殊。因此，各地区在长期实践的基础上，总结、探索出多种多样的行之有效的生态农业模式。根据自然环境类型及农业资源的利用方式，一般可分为平原区、山区、丘陵区、江湖塘区、沿海滩涂区、城郊区、庭院生态农业模式。

(一) 平原区生态农业模式

平原区的生态农业模式是根据平原区的农业生态特点，在尊重生态农业基本原理的前提下组装的农业生产系统。

我国幅员辽阔，各地自然、社会条件差异很大，尤其是南北差异造成经济发展的不平衡。但总的来说平原区农业生态条件具有自身的特点。

1. 平原区农业生态条件特点

1) 土地平坦、耕作连片、交通便利、信息丰富，各种先进技术、机械化到位率

高，是农业发展的主要基地。平原区有比较优越的农业自然条件，其土地生产力最高。其农业模式属于高投入，高产出，技术密集的农业类型。充分利用各种自然资源，加大农业投入，提高土地利用强度是其农业向深度和广度发展的根本问题。与此同时，还必须加强环境保护和合理利用好耕地，平原地区往往工业发达，是经济、文化的中心，耕地锐减与环境污染是该区今后农业发展的不利因素，在有限的耕地上采用间、混、套种立体种植技术，生物养地技术与生物防治技术，以实现该区高产、优质、高效、持续、稳定的农业发展目标。

2) 后备耕地不足，人、地矛盾突出。我国人多地少，耕地面积更是有限。在耕地减少的同时，人口的自然增长率却不断上升，从而造成了人口急剧增加与耕地大量减少的尖锐矛盾。因此，该区域的生态农业模式就以发展主体农业，提高光、热、气利用率为主攻方向。

3) 工业发达、社会经济条件优越，适于农林牧副渔整体组装配套，实行“种养加工”结合，走“农工商”协调发展的道路。良好的自然条件和工业基础，方便的交通和发达的经济为平原区农林牧副渔各业的发展提供了优越的社会经济条件。因此，其生态农业模式的建立必须根据当地环境和资源特点，合理调整产业结构，使农林牧副渔全面发展。

2. 平原区生态农业模式

1) 农田互利共生立体种植模式。农业环境空间具有层次性，不同生物依其生态习性在不同层次的环境空间生存。这种环境空间层次与农业生物生态习性的统一，是进行生态农业模式立体利用和设计的依据。所谓立体共生的生态农业模式，就是农业生产者在有限的农业环境里，为将其经营的生态系统形成一个稳定的多维结构而建立的多层次利用的生产形式。这种模式中，作物、果树、食用菌等生物种群合理排列与组合，占据不同的生态位，表现出互利性和互容性，使农田寸土不闲，产量和效益很高。这种模式包括以粮棉油作物为主的农田间套复种模式、粮棉油菜菌共生互利种植模式和农果共生互利种植模式等。

立体种植是平原区生态农业发展的主要模式，它能很好地解决人地矛盾，提高土地生产率，增强系统的抗逆性，提高农业经济效益，增加农民收入。

2) 种养结合模式。这类模式是将种植与养殖紧密结合，种植业为养殖业提供发展的物质来源，养殖业转化种植业的物质能量，形成经济产品，并为种植业提供肥料、资金等，促进种植业的发展。种植业的模式包括上述的农田互利共生种植模式；养殖业包括畜禽养殖、野生动物、微生物养殖及池塘养鱼，并根据种植业提供的饲料情况配置和调整优化养殖业结构。这一模式中很重要的一点是通过养殖业的转化，一些有机废弃物资源转化成了人类直接可用的经济产品。这种模式包括对废物资源多级利用循环生产的平原区家庭养殖模式，渔、作物结合的“稻田养鱼”模式，渔、林结合的“桑基鱼塘”模式(图 3-4)和以鱼改碱的“碱地养鱼”模式等。

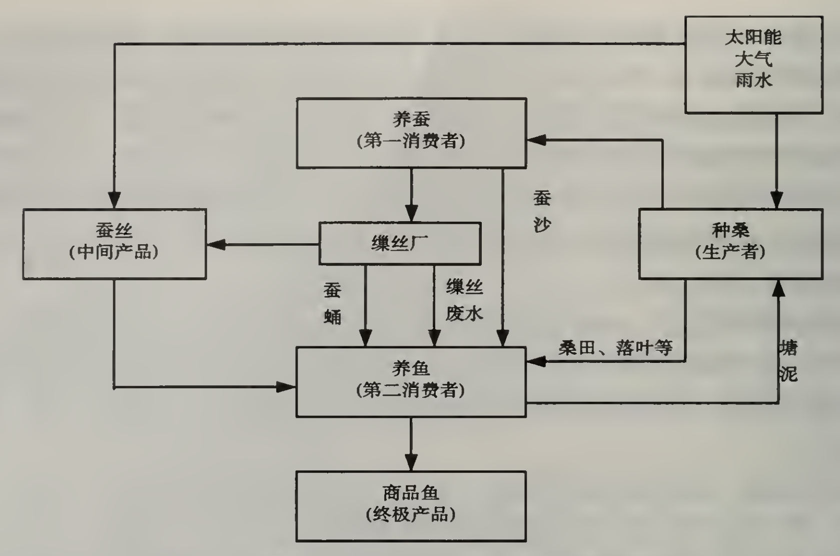


图 3-4 “桑基鱼塘”模式图(引自杨文宪等 1999)

3) 种、养、加工结合型。这类模式是在种养结合模式的基础上增加了加工业，使系统内的物质和能量的流向更为合理，效益增加，形成了生态经济上的良性循环。这类模式的最大特点是增加了“加工链”，加工项目主要是以第一性和第二性生产产品加工为主的无污染或少污染项目。加工业的发展促进了种植、养殖业的发展，起到了以工补农、以工促农的作用，同时解决了农村剩余劳动力的就业问题，社会效益与经济效益同步提高。

4) 贸工农开放复合模式。这类模式是根据市场的消费趋势，及时调整产业结构和产品结构及其整体功能建立起来的，最大的特点是商品性强，是以商品生产的规律指导加工业的布局和结构，带动养殖业、种植业的发展；是以市场为中心，兼顾国家计划发展种养业的。这类模式目标主要在平原区的城郊和发达地区实施。

5) 整体规划的生态农业模式。整体规划的生态农业模式，是以生态学理论为依据，在某一特定区域内(如一个农户、自然村、乡、县等)，因地制宜地规划、组织和进行生产的农业生态系统，其主要内容有生态农业户、生态农业村和生态农业县等。

(二) 山区、丘陵区生态农业模式

我国是世界上多山的国家之一，山地面积占国土面积的 2/3，大约 70%的县市位于山区，居住着全国 1/3 的人口，是主要的贫困地区，山区、丘陵区生态农业建设具有重要意义。

1. 山区、丘陵区生态经济特点

1) 地形地貌复杂，沟壑切割破碎。山区一般包括丘陵、山地和高原三大地貌类型。丘陵一般起伏比较平缓，没有突出的高峰和山脉走向，农业垂直地带分布不明显，土地垦殖率高，常为重要的农业区，而且种植经济林木和果树的条件也很优越。但比平

原地区坡耕地多，往往开垦过度，引起水土流失，引水灌溉和机械化作业困难。山地海拔高，农业垂直地带分布显著，地势起伏大、陡坡多、谷地区狭窄，可垦农田面积有限而分布零散，但山区发展林业及林副业、畜牧业的条件十分优越。另外山区、丘陵区又多交通闭塞、少数民族分布多，因此必须加强技术推广力度，充分发挥山区、丘陵区的自然优势，实行农业立体综合开发。

2) 自然资源丰富，具有发展多种经营的有利条件。山区是我国基本建设和生活用材的主要供应基地，又是大部分经济林木，如茶叶、粮食、油料、干鲜果土特产品的生产地。山区还有丰富的野生动植物资源，如菜用植物、药用植物、蜜源植物等。只要合理利用这些资源，做到适地种树和适地种草，就可以建立种类多样的商品生产基地，提供大量的食品、干鲜果品、药品和工业原料，为当地乡镇企业发展创造条件。

3) 北方山区生态环境恶化，农业生产效益低下。山区、丘陵区由于资源利用不合理或长期掠夺性乱砍滥伐，致使森林资源破坏，水土流失加重，生态环境恶化。另外，某些地区产业结构单一，土地利用不合理，采用广种薄收、单一垦殖经营，造成越垦越穷、越穷越垦的恶性循环，形成到处荒山秃岭的状况，更加重了水土流失。因此，水土保持是山区生产建设的根本措施，同时要积极营造薪炭林，以便解决农村能源问题。

4) 山区经济、科技、文化、教育落后，人口盲目增长，造成燃料、肥料、饲料紧缺，加剧了人为对自然的破坏。因此，山区生态农业模式建立的重要任务是提高农民的文化素质，增加农业生产的科技含量，组建以保水为核心的农、林、牧综合发展系统。

5) 山区一般距工业区较远，污染轻或基本不受污染，因此山区具有开发生产绿色食品的基础条件，同时山区经济受技术、资金、人员素质的限制，开发难度大、效益差。发展绿色食品，规模经营则可以扬长避短，将其生态优势转化为经济优势。

2. 山区、丘陵区生态农业模式

(1) 我国南方红壤丘陵区立体农业开发模式

江西省泰和县千烟洲是我国南方亚热带红壤丘陵区一个人均耕地较多，土地后备资源充足的小村，该村实行的“丘上林草丘间塘，河谷滩地果鱼塘”的立体农业布局，以及以林、果为主导的土地资源开发方式和“先予而后取”的治理策略，形成了我国红壤丘陵区立体农业的综合开发模式。这种模式的关键措施和主要经验有：① 以治水为突破口，立足沟谷，建设高产基本农田；② 以林、果为主导，改善生态环境，提高开发的综合效益；③ 广东省实行多种经营，蓄养结合、农牧结合。

(2) 我国北方山区小流域综合治理型生态农业模式

小流域综合治理是山西省 20 世纪 80 年代首先开展的，着眼于解决水土流失，保护下游村庄、农田、河道的农业生态工程。刚开始实行承包制，承包户就在流域内发展经济林木和种草发展畜牧业。后来在科技人员帮助下，很快发展为小流域综合开发和治理，规模也愈来愈大，从几平方公里到几十平方公理，涉及几个村或几个乡。在一个流域内，从山顶到山沟，统一安排农业生产和治理工程，不仅治理了水土流失，还把小流域建设成综合生产基地。从各地模式分析，其形式大体相似：山顶造防护林和种牧草；山中部种干果，山下部种水果；山沟两岸是农田，村落散布其中。沟里有蓄水工程，坡

上有旱井，有的山顶还有蓄水设施，蓄积雨水，用于灌溉农田和果园，一般采用节水灌溉技术。

(3) 林业先导型生态农业模式

在我国北方一些既有丘陵山地，又有河川平坝的地区，可选择林果业作为发展生态经济的突破口，大力发展林业，既种植防护林防风固沙，又种植薪炭林解决农民的燃料问题，同时栽种大量经济林增加农民收入。由于绿化面积的扩大，改善了生态环境条件，也促进了农业的发展。这种模式的主要措施有：① 以改善生态环境为重点，狠抓造林绿化；② 实行综合治理，建立林果生产基地；③ 狠抓各种资源的综合利用，提高农业生态效益；④ 狠抓龙头企业建设，保证生态农业的良性循环。

(4) 农牧结合、粮草轮作型生态农业模式

我国北方干旱、半干旱地区人少地多，干旱而多风沙，土地贫瘠，水土流失严重。造林、种草，实行粮草轮作，并进一步发展农牧结合是农业生产由恶性循环向良性循环转变的有效途径。

(三) 城郊区生态农业模式

城郊区是沟通城乡之间物质、文化经济、科技等交流的纽带，具有城乡一体化的特点：一方面郊区从属于城市，对城市有着很大的依托性。郊区农村商品经济的发展受城市的经济、技术、市场等多种因素的制约。如城市市场对农副产品需求状况的变化，直接影响着郊区农业商品经济的调整和生产结构的配置。同时，郊区和城市在资源利用上具有整体性，在治理改善生态环境质量方面具有共同性。另一方面，城郊型生态农业同其他区域生态模式一样，是按照自然、社会经济的差异性和统一性原则建立起来的可控性较强的人工生态系统。它既有区域性，即城郊的区域特性，又有发展的阶段性，即发展城郊型生态农业应该具备一定的基础，在一般生态农业发展到一定阶段后逐步形成结构功能更合理、商品化程度较高的生态农业模式。

城郊生态农业建设应根据当地的自然地理条件和社会经济条件，在充分利用当地资源的基础上，围绕城市农副产品需求情况，建立合理的食物链结构，形成不同类型、不同层次、不同规模的物质能量良性循环。我国在这方面已进行了广泛的探讨，设计创造了许多独具特色的模式。总体上讲，可根据近郊、远郊、郊县生态环境类型及自然资源和社会资源状况，设计具有地区特色的农业生产结构。

1. 近郊的“贸工农”、“贸工商”生态农业模式

城市为近郊提供了农副产品市场、对外贸易及发展乡镇加工业和第三产业的优势条件，近郊生态农业建设应立足于这一优势，大力发展以农畜产品加工为主体的乡镇企业和商业服务性产业。如建立肉类加工厂、食品加工厂、奶制品厂等。以乡镇工业和第三产业为龙头，带动养殖业、种植业、林果业的发展。养殖业要充分利用城市食品工业下脚料和农业生产提供的饲料、饲草，重点发展畜禽养殖，为城市提供牛奶、禽蛋、猪肉等主要副食品。种植业要从近郊污染重的实际出发，减少根、茎、叶菜面积，主要安排

以满足养殖业、食品工业原料为目的的作物生产。林果业以建立城市绿色保护圈为目的，适度扩大葡萄、猕猴桃、樱桃、杏等不便运输、市场紧俏的稀有果品面积。随着城市人民生活水平的提高，精神生活的投入逐渐增加，因此，美化环境、美化生活的花卉、苗木、草坪需求量增加，近郊可建立一些花卉、草坪生产基地。同时可建立园艺性公园，为城市居民提供旅游、疗养场所。

2. 远郊以“无公害”蔬菜生产为目的的生态农业模式

蔬菜是城市居民日常生活不可缺少的主要副食品，发展蔬菜生产是郊区农业服务于城市的一个主要方面。在城市远郊，自然条件适宜、污染少的区域，建立“无公害”蔬菜生产基地，并根据产业规模与数量并重的原则，在突出蔬菜生产的基础上，因地制宜，发展其他辅助性产业，形成以莱为主的生态农业模式。

3. 郊县资源利用型生态农业模式

郊县与郊区相比，交通往往不便，科技信息不畅。这些地区生态农业建设应根据土壤、水域、莱场、森林等自然资源状况，合理开发利用，建立为城市提供肉、蛋、奶、鱼、果等农副产品的生产基地，并围绕基地生产，合理配置各业比重，以保证资源的永续利用。

(四) 江湖塘区生态农业模式

近年来，随着人民生活水平的不断提高，被人们称之为“蓝色革命”的水域开发发展很快，在一些江湖塘地区形成了各具特色的生态农业模式。人类已经把未来解决对蛋白质需求的希望寄托在了水产生物的开发上。

1. 江湖塘区生态农业特点

1) 水产资源丰富。我国是世界上内陆水域最大的国家之一，江河纵横，湖泊、水库、塘堰星罗棋布。我国有淡水鱼类约 800 种，其中主要的经济鱼类有青、草、鲢、鳙、鲫、鳊、鲂、银鱼等 50 多种，还有丰富的虾、蟹、蚌、螺、蚬及浮萍、芦苇、莲藕、芡实、菱等经济水生生物，其种类之多，资源之丰富，均居世界首位。

2) 淡水养殖技术全面、经验丰富。我国地跨热带、亚热带和温带，发展淡水养殖的条件十分优越，其潜力很大。我国劳动人民淡水养鱼历史悠久，有 3000 多年以上的历史，淡水鱼种类、总量居世界第一位。公元前 460 年，范蠡就写了世界上第一部养鱼的著作《养鱼经》。我国农牧鱼相结合的养鱼技术，一直被世界公认。

3) 淡水养殖具有明显的区域分布。我国淡水渔业发达地区主要分布在长江、淮河流域，其水域面积占全国内陆水面的 47%，淡水鱼种类占全国的一半，捕捞量占全国的三分之二，也是全国淡水鱼类的最大产区；珠江流域淡水鱼区产量仅次于长江、淮河流域区，居第二位，是全国单产最高的地区，以人工养殖为主，生产专业化程度高、技术好、经验丰富，商品率高，每年可捕捞二三次。黄河、海河流域淡水鱼区生产基础相对较差，发展较缓慢。黑龙江、辽河流域是我国冷水性淡水鱼产区之一，水面利用率低，

而且多数湖泊为咸水，水域污染严重。内蒙古、新疆及青藏区，水面不够稳定，湖水冰期较长，夏季温度也低，而且多数湖泊为咸水，水中有机物缺乏，鱼类品种少，繁殖慢，发展淡水鱼的自然条件制约性强。

4) 淡水养殖的季节性与时效性较强。一般水域系统，夏季雨量充足，径流增加，水体普遍变大，水生植物光合作用增强，饲料丰富，鱼类生长快；冬季水温低，饲料较少，鱼类生长慢。因此，鱼类的生长与捕捞具有季节性强的特征。同时水产品具有易腐性，上市集中，且商品率高，故其时效性也强。

5) 水域生产的整体性与持续性较好。其整体性体现在水域中动植物共生，种植与养殖在同一水体中进行；浮水与沉水植物、浮游植物与浮游动物及底栖动物等共同生活在同一水体，相互之间形成了互利共生关系，它们之间不断进行物质、能量交换。其中某一因素的变动会引起其他因素的变动；同时水域系统生产还与农林牧副业等生产联系为一体，具有排灌、水运、发电、旅游等一系列功能，使其相互联系，形成直接的促进或抑制作用。因此，水域开发必须遵守整体利用、综合开发的原则。其持续性是指作为以渔业养殖为重点的水生动植物，是有生命的再生资源，这些动植物有自己的生长、繁殖、衰退过程，如果保护得当、利用适度，会不断再生，能够永续利用；然而渔业资源自然再生周期短，人的干预至关重要，过度捕捞会破坏其动植物结构比例和物质能量的交换，使资源的再生机能受到破坏，从而影响生产的持续进行。

2. 江湖塘区生态农业的模式

(1) 渔农综合型

1) 基塘渔业模式，主要有桑基鱼塘、蔗基鱼塘、果基鱼塘、花基鱼塘等；

2) 种草养鱼模式；

3) 稻田养鱼模式和稻、萍、鱼模式。

(2) 渔牧综合类型

1) 鱼禽综合模式，主要有鱼、鸭模式，鱼、鹅模式和鱼鸡模式；

2) 鱼畜综合模式，主要有鱼、猪模式，鱼、牛模式和鱼羊模式。

(3) 渔农牧综合类型

1) 三元模式，主要有菜、猪、鱼模式，猪、草、鱼模式，鸭、草、鱼模式和鸡、猪、鱼模式；

2) 多元模式，主要有鱼、鸡、草(菜)、猪模式，鱼、猪、沼气、草模式，鱼、猪、鹅、鸭、草(菜)、林果模式。

(4) 其他类型

1) 鱼、水生经济植物综合模式，主要有鱼、芡、菱、藕模式，鱼、猪、菱、藕模式和鱼、芦苇模式；

2) 鱼、特种经济动物综合养殖模式，主要有鱼、鳖混养，鱼、蚌混养，鱼、虾混养和鱼、蟹混养；

3) 主要养殖鱼类的水体立体混养模式，即鲢、鳙(上层)—草鱼、鳊鱼(中层)—青、

鲤、鲫(下层)。

4)“三网”养鱼模式。网箱、网围、网栏养鱼全称“三网”养鱼。它是在大水面上围栏养殖的半人工生态系统，密养的集约化养殖方式，简称“小、精、高”养殖，即水面利用上是“以小制大”；在饲料肥料循环上是“以精带粗”；在产量、质量、效益上是“高产、优质、高效”。

(五) 农村庭院生态经营模式

农村庭院是我国 80%以上人口居住的地方，是我国人类社会的一个重要组成部分，它具有独特的生态环境、特定的自然景观、多产业的经济活动和风俗、伦理、文化等的发展与更迭。在我国，一方面农村庭院是农业生产活动的重要场所，它包含了农、牧、副、渔、工、商、交通、建筑、金融、文化、教育、法律、社会服务、风俗、伦理等全部人类社会活动的内容；另一方面，农村问题却长期被忽略和轻视，成为一个亟待开发的领域，需要我们下大力量研究和探索。随着对农村人类居住地这一新领域研究的不断深入，农业庭院生态模式成了生态农业中一个十分重要的组成部分。

农村庭院环境与庭院中的人类、人类饲养的家畜家禽、种植的各种植物及庭院中伴生的各种动植物构成了一个复杂的生态系统，即农业庭院生态系统。农业庭院生态系统是农业生态系统和人类生态系统结合而成的特殊系统。它本身既具有人类生态系统的属性，又具有农业生态系统的属性。

1. 农村庭院生态系统特点

1) 人类与生物在小范围内共生。从农业生态系统来讲，人与生物有着密切的关系。然而，在庭院这个很小的范围内，人类和生物高密度地共生，却是十分突出的。在有限的土地面积内集中了动物(家畜、家禽、伴生动物和昆虫)、植物(树木、花卉、蔬菜和野草)、微生物，这种现象是很特殊的。所以，农村庭院生态系统生物之间的关系十分复杂，是一个极其活跃的复合群体。

2) 多级生产共存。农村庭院生态系统不但与其他生态系统一样，具有由生产者、消费者形成的食物链关系；同时还存在着加工、交换和贮存。它规模小，项目选择性大，融技术密集、劳动密集于一体，实现低投入、高产出，低能耗、高积累的目标。因此，农村庭院生态系统比其他生态系统更加复杂和多样。

3) 自然环境和人工环境共存。在庭院生态系统中除了自然环境外，更多的是由人类建造和调控的人工环境。由于人类的强烈干预，使原来就很复杂的环境因子变得更加复杂多样。在这种复杂多变的环境条件下，可以生活各种各样的生物群体。同时，农村庭院生态系统的生物种群与其所处的农田生态系统的生物种群的组成和它们的生长发育规律具有很大的差异。有些在当地农田中本来不能够生存的生物种群，在庭院中却可以很好地生存繁衍。而且，同一种群的生长发育规律同农田也有很大差别。

4) 农村庭院生态系统是物质、能量的高度密集区。农村庭院是农业生态系统物质能量的“汇”，农业生态系统 80%左右的能量和物质都要集聚在这里。假如把整个农业

生态系统的有机质抽象化，村镇庭院就像一个个小丘，这些小丘就面积来讲，最多是土地面积的 10%，但是它却“富集”了 80%以上的有机物质。这些有机质要在有限的面积内贮藏、加工、转化。有机质虽然是构成生态系统的基本物质，但是它们也是最不稳定的，处理不当就会影响到生态系统。怎样使农业生态系统生产的物质(有机物)按人类意愿循环转化，最大限度地形成经济产品，增加本系统的效益，同时又不会由于有机质的富集给生态环境带来不良影响，这就需要我们进行大量的调控工作。比如，人类生态系统、畜牧业生态系统和农副产品加工系统产生的三废(如人粪尿、垃圾、畜禽粪便)都是环境污染源。但是，它们对于农业生态系统来讲却是重要的宝贵资源。

农业庭院经济是以农户庭院为依托，延至庭院周围的荒山、荒地、荒水和“四边”地，包括自留山、自留地和批准同意经营的“鸡鸭田”，充分利用庭院设施、自然资源、经济、技术等优势，进行种、养、加工、贸易和第二、三产业的一种家庭商品经济形式。

2. 农村庭院生态经济模式

(1) 多种经营模式

庭院经营的对象是环境复杂的小院，在这样的条件下，应该因地制宜地利用，采取多种经营的措施，比如，阴凉的地方可以种植耐阴的经济植物(像食用菌、药材)或养殖喜欢阴湿的动物(如土元、蝎子、蜈蚣等)，而院子阳光好的地方可以种果树、花卉、蔬菜、药材。养殖业大部分应布在离居室较远的角落，温室和塑料大棚应安排在向阳避风的地方。庭院养殖业效益较高，但对环境影响也最大，合理的安排很重要。

(2) 多层利用空间模式

庭院的水平面积是有限的，同时，2m 以下的常规利用层次首先要保证人类的需要。这样以来就要考虑有限的空间的多层次利用，将作物布局方式由单面向立体方向发展，巧妙利用各类作物在生产过程中的“空间差”，进行精心组装、合理搭配，否则就无法提高其经营效益。多层次利用，在农业生态结构中称其为“垂直结构”，有的叫“立体农业”。虽然多层次利用层越厚，层次越多，其经济效益也越高，但是必须因地制宜，合理安排，由简到繁，逐步深入，不能一味追求多层次。

(3) 巧用时间模式

合理经营产品的价格往往因时而异。同一种产品上市时间不同，其价格可相差几倍到几十倍。另外，经营时间长短也是产出多少的关键。如何延长生产时间是发挥庭院经营效益的另一出路。所以，时间上的巧安排在庭院经营中尤为重要。在时间利用上有以下几种类型：

1) 时间嵌合型。就是把不同种或同一种的不同生长时间合理搭配，使产品多次产出。比如，用庭院早春季节育菜秧，菜秧售出后立即栽上月季，月季售出后插菊花，菊花售出后再育菜秧，一年可产三茬。另一种方式是使多种蔬菜生长期相交叠，实现一年多茬。养殖业中也可以采取这种途径，比如，养肉鸡户，在头批肉鸡售出前月余购入雏鸡，等头批出售后第二批马上继续上，这就可以实现一年多批。

2) 环境设施型。一种生产需要一定的环境条件，而环境条件是随季节变化的。怎

样在环境改变后仍能继续生产，这就要人工建造环境控制设施，像塑料大棚、温室、阳畦、风障、地膜覆盖、凉棚等。由于这些设施的使用改变了动植物生长的温湿度和光照条件，使生长期延长，从而取得高产出。养殖业也可以采用人工设施来增加生产，像蛋鸡的辅助光照，冬季保温均属此类。

3) 变更产出期型。庭院经营产品、数量相对较少，假如出售时间与大量产品同时，那它的收入是不会很高的。利用庭院的特殊条件，使其产期与一般产品的生产时间错开，突出“人无我有，人有我早(或晚)”的特点，其效益就可成几倍或几十倍增加。

4) 长短结合型。庭院中栽植果树、养奶牛等项生产要想获利一般需要 3~5 年。为了早受益，就应当经营一些短期见效项目来搭配，实现“长短结合，以短养长”。

(4) 食物链多次增值模式

庭院生态系统是农业生态系统的一个亚系统。一般地讲农业生态系统的产品输出以原料形式进行，像原棉、原粮、水果、生猪等。同时，它的食物链结构一般都比较短，所以其效益较低。如果能根据庭院生态系统中的营养层次和能量金字塔的原理增加食物链的环节(营养级)，可以达到产品多层次利用的目的；或者经过加工实现精品输出，增加产值的目的。

1) 巧用食物链。农副产品以庭院作为集中地，庭院养殖业一般又都是利用农副产品进行的。假如根据食物链原理使有机质多层次利用，就会变废为宝，多次增值。像利用农副产品养鸡，鸡粪喂猪，猪粪养蝇蛆，蝇蛆再喂鸡，形成了一个高效的循环圈，使有机质循环利用，结果就实现了“蛋多、猪肥、成本低”的高效益。根据这一道理，还可以加长这个循环链条，效益也就更加突出。假如在庭院里再栽上葡萄，养上鱼，这个系统就更复杂，效益就更可观了。另外，用黄豆做豆腐，豆渣浆水喂鸡和猪，就又是一个高效益的循环圈。

2) 加工与贮藏增值。利用庭院进行农副产品的加工，是一条重要出路，既使生产的成品增加了价值，加工的剩余物又可以发展养殖业，一举可以数得。鲜活产品的贮藏保鲜也是庭院经营的出路，像蔬菜水果经贮藏保鲜，价值可以增加几倍到十几倍。

第四章　森林生态学

第一节　导　　论

一、森林生态学概念

森林生态学(forest ecology)是以森林生态系统为研究对象，它把森林看做一个生物群落，研究构成这个群落的各树木之间，树木与生物之间及生物与它们所在的内外环境之间的相互关系，并把这种关系应用到林业建设实践之中。目前常把森林群落和生态环境看做是一个不可分割的整体，从森林生态系统的角度研究系统内植物、动物在其所在环境中彼此相互依赖的因果关系，以及各个成分之间物质和能量循环转化的过程。

二、森林生态学的发展

法国和德国的一些林学家们早在 19 世纪初就开始把营林实践建立在科学的基础上。德国 Heyer 在《林木对光和遮阴的反应》一书中系统论述了林木耐阴性理论，这是最早的关于森林生态学范畴的著作。1895 年丹麦 Warming 的《植物生态学》一书问世，随后林学家和植物学家开始结合起来，借助于实验的方法研究森林群落和立地条件相互作用的基本原理。20 世纪初，德国 Mayr 等科学家又应用生物学、物理学、化学等基础科学作为林学的理论，研究立地条件和森林植被的相关性。到了 20 世纪 20 年代，林业科学和生态学都有了很大的发展，营林学基础从森林学中分出来成为生态学的一个分支，即森林生态学。但早期的森林生态学忽视了对动物(包括土壤动物和微生物)和群落及群落和环境之间相互关系的研究，直到 20 世纪 60 年代以后，现代生态学才集中于生物群落中植物、动物、微生物的相互作用及其与环境所组成的功能单位即生态系统的研究。70 年代又逐渐形成了生态科学的一个新领域——系统生态学，森林生态学也随之有了新的飞跃。1992 年在巴西召开了联合国“环境与发展”大会，肯定并统一了可持续发展并制定了 21 世纪议程，从而使得森林生态学的研究内容发生了实质性的变化。

我国早在 2000 年以前就注意到了土壤、气候对树木生长的影响等生态现象。如《淮南子》一书记有“欲知其地，物其树”，其后许多古书如《齐民要术》、《群芳谱》等都有森林生态学的内容。解放后，随着林业生产的发展，我国不仅在造林树种的生态学特性等个体生态学方面有了深入研究，而且在群体生态学方面也有了较大的发展。

而今，经历了若干世纪的林业发展史，特别是近年来森林盲目开发，世界又面临新的挑战。发展中国家人口增加，烧柴短缺，森林受到严重的破坏；国际财团掠夺性开发

森林，热带森林减少，环境恶化；发达国家温室气体排放严重，温室效应加剧，温带森林不断减少。日益严重的环境问题迫使人们不断地从历史和现实中总结经验和教训，探索符合时代发展的新路子，从过去仅仅局限于森林的多用途转向森林的多种防护效能上。为了进一步发挥森林的作用，在保护和经营好现有林的同时，大力开展人工造林，减轻现有林压力，改善人工林的经营方式。本章在了解森林群落的分类和功能的基础上，从树种和林分入手，对森林生态系统作了生态分析，论述并总结了森林研究中的一些基本的生态学原理及这些原理在造林、营林、次生林改造和生态园林等方面的应用。

第二节　森林生态系统

森林生态系统(forest ecosystem)主要指以乔木为建群种或优势种的生物群落与其所在生态环境相互作用，形成一个相对稳定的生态系统。如今森林生态系统作为发育最高阶段、结构最为复杂的植被类型，已不再是一个单纯的客观存在的自然体，而是人类经营加工的对象，与国民经济和人民生活水平发展有着极其密切的关系。因而，只有正确认识森林生态系统的内在规律，才能使森林生态系统朝着有利于人类的方向发展。

一、森林生态系统的分类

(一) 世界森林生态系统分类

由于气候是影响森林分布的重要条件，而气候在地球表面又是有规律变化的，因而根据森林植被类型，将世界森林生态系统划分为具有一定地带性并与其气候条件相适应的地带性植被类型。

1．针叶林生态系统

针叶林几乎全部分部于北半球高纬地区，占据温带到寒带广大的面积。气候特点是夏季温暖而短暂，冬季严寒而漫长，年降水量多为 300~600mm，以大陆性气候为特点， 属于大陆型的针叶林。

针叶林树种组成简单，通常是以云杉、冷杉、落叶松或松占优势，常组成大面积的纯林。针叶林的层次也较简单，林下有灌木层和苔藓层。由于生境冷湿，残落物分解不良，林地上积累有很厚的死地被层。针叶林在欧亚大陆的北部和北美洲分布最为普遍。 此外，中纬度和低纬度亚高山地带也常有针叶林的片段分布。

2．落叶阔叶林生态系统

这一类型分布于北纬 30°~50°的温带地区。由于在该区域内冬季落叶、夏季生长，故又称夏绿林。落叶阔叶林分布区的气候特点是：一年四季分明，夏季炎热多雨，冬季寒冷。

这类森林中的乔木树种都具有较宽的叶片且质地较薄。落叶是对冬季严寒和生理干

旱的一种适应，而粗厚的树皮和具鳞片和树脂的冬芽则是对冬季低温的一种保护适应。 在欧洲西部最为典型的是由山毛榉属组成的落叶阔叶林。在欧洲、亚洲和北美广泛分布的是由栎属、槭属、核桃属、山核桃属及鹅掌楸所组成的落叶阔叶林，其中亚洲东部是落叶阔叶林种类成分最丰富的地区。

3．硬叶常绿阔叶林生态系统

这种森林主要分布于亚热带夏季干燥炎热、冬季温和多雨的气候区域内。在各大洲都有或多或少的分布，但以地中海沿岸最为典型。

干燥炎热的夏季气候使那里的树木产生与此相适应的旱生结构。例如叶片通常不大，常绿、坚硬、常被毛茸、呈灰绿色，或者是叶子退化形成针刺状或茎为绿色代替叶子进行光合作用。地中海区分布着以栓皮栎和刺叶栎为主的硬叶常绿阔叶林。此外，油橄榄也是地中海的典型植物之一。北美加里福尼亚州北部和俄勒岗州南部分布着在群落外貌上与地中海相似的栎属的硬叶常绿阔叶林，种类比欧洲的要多。大洋洲的硬叶林通常是以桉属的若干种占优势的混交林或由其中一个种构成的纯林，这种森林高达60~70m，分枝很高，林内明亮，下木发达，但缺乏藤本和附生植物。

4．亚热带常绿阔叶林生态系统

主要分布于南北纬 25°~40°之间的亚热带地区。气候特点是四季分明，夏季高温潮湿，冬季降水较少，有时出现霜雪，但无严寒。

这类森林以壳斗科、樟科、山茶科、木兰科、金缕梅科为典型代表，叶片大小中等、椭圆形、渐尖、革质，叶面有光泽而无毛茸，叶片排列方向与阳光垂直。群落内部结构比较简单，乔木通常只有 1~2 层，其下有较发达的灌木和草本层，层间植物的种类和数量较少。群落常年以浓绿色为主。北美太平洋沿岸分布着以红杉为主的常绿林，它与大洋洲的王桉一样，是世界上最高大的森林。在日本和我国东南沿海地区分布着以樟科和壳斗科为主的常绿阔叶树种。



图 4-1 西双版纳小勐养热带雨林内部及其上层乔木番龙眼的板状根(曾觉民 1979)

5．季雨林生态系统

普遍分布于东南亚地区，以印度、缅甸中部及巽他群岛的东南部岛屿为典型。我国云南南部也有零星分布。

这一群落的特点是群落结构比雨林简单，林内的藤本和附生植物较少。组成较雨林贫乏，年季相变化比较明显，大多数乔木树种于旱季落叶，雨季来临时又陆续发芽生长。季雨林常为混交林。具有大型

叶片的柚木形成的纯林是季雨林的另一种主要类型，柚木于旱季落叶，林下常有合欢属和金合欢属的一些种类。

6．热带雨林生态系统

主要分布于南美洲、非洲、亚洲热带和澳大利亚东北部的潮湿热带地区。水热条件充沛，分布均匀，全年平均气温在 23~28℃之间，年降雨量通常超过 2000mm，且无明显旺季，相对湿度常达 90%，土壤类型以砖红壤为主。

热带雨林种类组成极为丰富，高等植物多达 45 000 种且多为木本，板状根(图 4-1)、裸芽、茎花、多昆虫授粉、叶常绿、革质、中等大小、叶形一致是热带雨林乔木的特殊构造。藤本和附生植物发达，此外，热带雨林群落结构复杂，植物对群落的适应达到了完善的程度，每个种均占据自己的生态位，且其存在都以其他种的存在为前提。组成雨林的植物种终年生长，无明显的季节交替。

(二) 我国森林生态系统及分布

《中国植被》一书将我国植被划分 10 个植被型组，27 个植被型，560 多个群系，它们都是独特的生态系统。这些生态系统分布在 8 个植被区中(图 4-2)，这里根据我国植被区划类型，分别加以介绍。

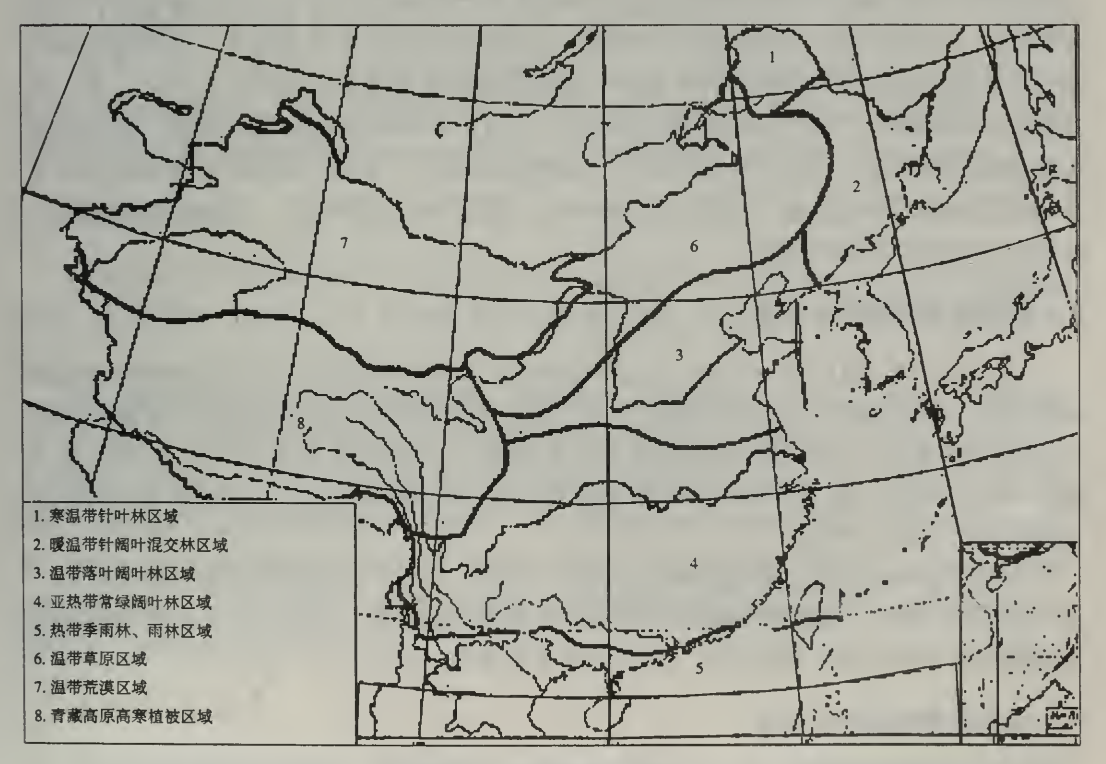


图 4-2　中国植被区划图

1．寒温带针叶林区域

包括东经 127°20′以西、北纬 49°20′以北的大兴安岭北部及其支脉伊勒呼里山的山地，是较冷的地区，年平均温度在-2~-5.6℃，全年降水量为 400~550mm。植被多为耐寒林木，土壤为棕色针叶林土。

严酷的气候条件使本地区组成群落的植物种类简单，尤其是优势树种单调，但生态可塑性较大，适应范围较广，代表性植被兴安落叶松(*Larix gmelinii*)林几乎从山麓到森林上限都有分布。该松林最适宜于生长在 500~1000m 山体中部，土壤多为肥沃湿润的阴坡，群落结构简单，草本植物不发达，下木多具旱生形态。在本地区东南部海拔 450~600m 以下的山麓部分，受附近温带针阔混交林的影响，在以兴安落叶松为优势的林内常混生一些以耐旱的蒙古栎为主的、数量不多、生长不良的温带阔叶树种，林下灌木和草本植物十分发达。随海拔的升高，兴安落叶松的生长逐渐衰退。

2．温带针阔混交林区域

本地区包括我国东北松嫩平原以东、松辽平原以北的广阔山地，南端以丹东为界，北部延至黑河以南的小兴安岭山地。该区因受日本海的影响，具有海洋性温带季风气候的特征。年平均气温较低，最低温度可达-30~-35℃。年降水量一般多在600~800mm之间，土壤以山地暗棕壤为主，低地则为草甸土和沼泽土。

该区植被以红松形成的温带针阔混交林为主，种类组成相当丰富。南部地带植物以红松为主，伴生种极其丰富且多为暖温带种类，针叶树种由沙冷杉和一些暖温性针叶树种组成，从而使这类针阔混交林多少具有一些南方(亚热带)景色的特点。北部地带林内则混生有较多的北方(亚寒带)针叶树种，伴生的阔叶树种也远不及南部。此外，在小兴安岭(700~1100m)、张广才岭(900~1500m)、长白山(1100~1800m)等山地还广泛分布着山地寒温针叶林带，以云杉和冷杉为主，树种组成单纯。本地区低湿的谷地零散分布有小面积隐域性的落叶松林(北部为兴安落叶松，南部为长白落叶松)，特殊的生境使落叶松林在谷地中生长相当稳定。

3．暖温带落叶阔叶林区域

本区位于北纬32°30′~42°30′，东经103°30′~124°10′的范围内。北与温带针阔混交林地区相接，南以秦岭、伏牛山和淮河为界，西自天水向西南经礼县到武都与青藏高原相分。由于该区位于中纬度及东亚海洋季风边缘，因而夏季炎热多雨、冬季严寒干燥，年平均气温一般为8~14℃，年降水量平均在500~1000mm之间，但雨量季节分配不均，多集中于5~9月之间。

本地区森林群落的主要建群种是栎属的一些落叶种类。除栎属外各地还有以桦木科、杨柳科、榆科、槭树科等树种所组成的各种落叶阔叶林。在次生林中松属植物往往形成纯林或与落叶阔叶树种混交，从而居于重要地位。

4．亚热带常绿阔叶林区域

该区北起秦岭淮河一线，南一直分布到广东、广西中部，西止于青藏高原东部，东

至东海、黄海海岸。气候温暖湿润，年平均气温 15~20℃，年降雨量一般不高于1000mm，土壤以酸性的红壤和黄壤为主。

这类森林的上层由常绿的阔叶树种组成，其中以壳斗科、樟科、木兰科、山茶科、金缕科为主，树冠整齐一致，呈半圆球形，乔木、灌木、草本中也多常绿种类。林内苔藓、藤本、附生植物非常普遍。群落内常有数个优势种，并常分为两个乔木亚层。在植物组成中，古老成分和孑遗植物丰富，是该区的又一大特色。分布于该区北部的常绿阔叶林，上层乔木多具有落叶成分，外貌上接近落叶阔叶林。分布于该区南部的常绿阔叶林，上层乔木以喜暖的种类为主，中下层则有较多的热带成分，从而具有一些雨林的特征。

5．热带季雨林、雨林区域

位于我国最南部，北接亚热带常绿阔叶林区域南界，最南端位于北纬 4°附近的南沙群岛，全区包括台湾、广东、广西、云南、西藏 5 省区的南部和海南的全部。该区气候特点为年平均温度约在 22℃以上，年降水量一般在 1200~2200mm，典型土壤为砖红壤。

本区森林类型多样化。在台湾南部、海南岛东南部、云南南部和西藏东南部主要分布有热带雨林，是我国所有森林类型中植物种类最为丰富的一种类型。受季风影响，中国雨林在种类组成和外貌上都不同于赤道雨林，表现为木本附生植物很少，具滴水叶尖的植物不多，龙脑香科树木的种类和数量有限，一些常绿树种在干季有一短暂集中的换叶期。我国热带季雨林分布于广东的湛江、化州、高州和阳江一线以南，广西的百色、田东、南宁、灵山一线以南全部低海拔地区。在外貌、结构和种类上与常绿林、雨林不具有显著区别。我国南海诸岛还分布有树种组成简单的珊瑚岛乔木林类型，目前生长较好和比较完整的是麻疯桐(*Pisonia grandis*)和海岸桐(*Guettarda speciosa*)纯林。

6．温带草原区域

中国温带的草原集中分布于北纬 35°~51°，南北跨 16 个纬度线，从东北平原到湟水河谷，东西绵延 2500km。气候为典型的大陆性气候，其中包括了半湿润的森林草原区。

该区森林在各山地的分布比较分散，主要有大兴安岭南部、阴山、贺兰山、阿尔泰山 4 个林区。大兴安岭南部的森林与大兴安岭北部寒温带针叶林相连，因而二者组成也十分相似。又因为该区的基带是温带草原，因而在低海拔地区森林中有大量的草原植被侵入，形成此林区森林植物组成的特点。阴山阴坡断续有疏林出现，阳坡则未出现森林。贺兰山林区在海拔 1500~2000m 出现山杨林，2000~2500m 分布有以油松为主的混交林或其纯林，2500~3000m 则为云杉林。阿尔泰林区的森林仅出现于山地较高垂直带范围内，以西伯利亚落叶松为主。

7．温带荒漠区域

包括新疆的准噶尔盆地、青海的柴达木盆地、甘肃与宁夏北部的阿拉善高原、内蒙古自治区鄂尔多斯台地的西端。该区气候干燥，冷热变化剧烈，风大沙多，年降雨量一

般低于 200mm。

在海拔为 1500~2700m 的天山坡面上，分布有雪松、云杉为主的寒温性针叶林带。西部的博乐—精河一带表现为云杉林带和草原群落结合的森林草原带。东部哈尔里山地随海拔升高依次表现为雪岭、云杉为主的暗针叶林，云杉、落叶松混交林，西伯利亚落叶松混交林。在海拔为 2500~3300m 的祁连山东部的阴坡、半阴坡上也分布着寒温性针叶林，与阳坡的草原组合成特殊的森林草原景观。伊犁山地分布有新疆野苹果和野杏为主的落叶阔叶林及野胡核林，中山带则以雪岭、云杉为主。

8．青藏高原寒温带区域

青藏高原位于我国西南部，包括西藏自治区绝大部分、青海南半部、四川西部及云南、甘肃和新疆部分地区。气候特点是寒冷干旱。森林主要分布于该区的东部，尤其是横断山脉地区，因受东南和西南季风影响，降水较多，年平均温度 0~8℃，在海拔 3000~4200m 以上出现山地寒温性针叶林，在该地区四川西部也分布着大面积的针叶林和片段的常绿阔叶林。其中 1800m 以下阴暗沟谷是以栾树、黄连木、苦枥木等为主的小片落叶林，在 1800~2400m 是以樟科、木兰科为主的常绿阔叶树种为主，还有少量水青树、连香树、槭、桦等落叶成分。在 2400~2800m 处则阴阳坡各有差异，阳坡为高山松林和松类灌丛，阴坡为铁杉、槭、桦等组成山地针阔混交林。2800~3600m 是我国杉类分布最为丰富的地区。

二、森林生态系统的功能

森林生态系统是陆地生态系统中分布最广、生物总量最大的植被类型。它不仅对于维持全球的能量流动和物质循环具有不可估量的意义，而且为人民的生活和经济建设提供多种直接和间接的经济效益。

首先，全球各种生态系统每年通过光合作用产生的有机物质约为 8.3×10^{10}t。其中陆地生态系统为 5.3×10^{10}t，占总量 64%，而陆地生态系统中又以森林生态系统居首位，森林生态系统每年通过光合作用产生的有机物质为 2.83×10^{10}t，占陆地有机物生产总量的 53%。从陆地生物总量看，整个陆地生态系统中生物总量为 180×10^{10}t，其中森林生态系统生物总量达 160×10^{10}t，约占陆地生物总量的 90%左右。

其次，森林的能量转化和物质循环具有很高的效率。地球上的能量是通过绿色植物的光合作用进入生态系统的，而森林生态系统则是各个生态系统中光能利用率最高的。如生物圈的平均光能利用率为 0.2%~0.5%，一般不超过 3%，而热带森林就可高达 3.5%。因而森林生态系统成为全球最重要的绿色能源，必然是今后主要利用方向。

此外，森林对人类的多种效益主要表现在：

1）丰富多样的森林生态系统不仅为工业提供各种优质木材，而且还可提供各种林副产品。造纸工业、有机化学合成工业、人造丝工业等部门的原料都来源于森林木材。随着现代生活品味的提高，木质的家庭用品也越来越多的出现在日常生活中。森林中的许多植物或作为重要的工业原料，或作为木本粮油植物，有的还是珍贵的野生药材。森林中的动物也可以提供珍贵的毛皮、肉类和名贵的药材。这些林副产品不仅用途

广泛，而且经济价值高，在经济建设和人民生活中占重要的地位。

2) 森林生态系统具有涵养水源的有益性能。森林对水的调节主要在于林下的枯枝落叶层及活的地被物能阻挡并吸收水分(表 4-1)。林木根系能固定土壤并使降水渗入土中，延续一段时间后再缓慢地补充河川流量，同时对水中的各种污染物进行直接过滤和净化。因此它可以增加生态系统中的有效水，减少无效水，起到蓄水、净水、减洪和保持水土的作用。

表 4-1　不同森林类型枯落物持水量表

观察项目 / 森林类型	枯落物层厚度 /cm				枯落物干重 /(t/hm²)	最大持水量 /(t/hm²)
	总厚度	未分解层	半分解层	分解层		
天然林	20	3	3	14	94.5	270.0
天然次生林	6	2	3.5	0.5	13.2	33.8
马尾松木莲混交林	8	4	1.5	2.5	38.6	105.1
马尾松林	6	2	2	2	36.1	109.2
杉木林	3	2	1	0	13.9	27.5
草坡	1	0	1	0	1.3	2.0

引自阎树文等　1982

3) 森林生态系统具有调节气候的有益性能。森林是改造自然、保护环境的有力武器。美国 Fernow、Harrington 和 Abbe 等人在 1893 年系统阐述了森林对各种环境因子的影响。此后又有人对有林地和无林地的气象因子进行了比较，证明：夏季和白天林内的气温比林外低 1~3℃，冬季和夜间则相反。林内相对湿度和绝对湿度在各种条件下均高于林外。风速则在任何条件下均小于林外。

4) 森林生态系统可以净化空气，保证人们身体健康。森林通过绿色植物的光合作用吸收二氧化碳，放出氧气，并有效地维持大气中氧气和二氧化碳的比例平衡。这也是人们常把森林比喻为“氧气制造厂”或“二氧化碳的净化厂”的原因。此外，某些森林叶子的挥发气体及根系的分泌物可以杀灭空气中的一些病源菌，对大气进行消毒，成为“天然的防役员”。有些森林叶子可以看做是“天然的吸尘器”，具有阻挡、滞留、黏附、过滤粉层的作用。

5) 森林生态系统是农作物稳产、高产的重要保障(表 4-2)。森林具有涵养水源、调节气候等有益的性能，所以积极保护和发展森林资源，有利于从根本上改善农业生产的生态环境，从而为农业的发展提供生态屏障。森林具有防风固沙、保持水土的有益性能。一般森林可降低风速 30%~40%。在林网保护下的农田，风灾、旱、涝灾害可以得到防止或其危害程度得以减轻。

表 4-2　林带与旱年作物的产量

作物	林带结构	产量 /(q/hm²)		增产量	
		林带地	开阔地	q/hm²	%
冬小麦	通风	24.9	21.2	3.7	17
	疏透	27.4	23.8	3.6	15
	紧密	22.1	19.8	2.2	11

	通风	24.2	18.8	5.4	29
春小麦	疏透	21.8	18.5	3.3	18
	紧密	19.3	17.2	2.1	12

引自米特谢尔道夫和安托扭克　1976

6) 森林具有减弱噪声的作用。据研究，宽度为 50m 的绿化地带，交通噪音可下降 20~30dB，为人类提供安宁、舒适的工作、学习环境。人们把森林喻作“噪音隔音板”，是森林减弱噪音的形象表述。事实上，人类采用森林降低噪音强度已取得明显的效果。据苏联资料：稀疏的树木群比成行的树木群更能防止噪音。乔木分枝低的、树冠低的比高的效果要好。灌木作用比乔木要大，绿化的街道比不绿化的街道减少噪音 8~10dB。

7) 森林生态系统具有保护生物多样性的作用。森林作为最复杂的生态系统是自然界最完善的资源库。近年来，我国的森林覆盖率在增长，但作为生物多样性资源库的天然林仍在减少，并且残存的天然林也处于退化状态，从而引发物种濒危和灭绝，生物多样性锐减。这种损失使生物圈的稳定性变得十分脆弱，最终危及人类自身的生存。

第三节　森林生态系统的生态研究

一、树 种 研 究

树种在整个生命活动过程中在形态和生长发育上所表现出来的特点和需要综合称为树种的生物学特性。如树木的外形、寿命长短、生长快慢、繁殖方式、萌芽、开花结实等特点都属于其生物学特性。这些特性决定于树种的遗传因素，并受周围环境条件的深刻影响。树种同外界条件相互作用中所表现的不同要求和适应能力称为树种的生态学特性。如耐阴性、耐寒性、抗风性、耐烟性及对土壤条件的要求等。树种的生物学特性和生态学特性是长期适应环境的产物，是自然选择的结果。所有树种的这种特性的形成是以树种的遗传性质为内在基础，同时又受外界环境的影响。树种的这一稳定性，要求每一树种占据某一特定范围的分布区域，同时这一分布区随外界环境因素的变化而发生相应的变迁与发展，称为树种的分布特性。

在了解树种的林学特性及分布特性的基础上，主要研究树种的育种及种的适应性。一粒种子从播种萌发，经过生长、开花、结实、到产生种子，其中的每一个环节所需要的能量和物质均取自于周围环境，能量和物质供应的数量、质量和速度随环境条件而异。环境条件的变化必然影响生活其中的树种，树种适应变化的环境必然在形态结构、生理特性和遗传本质上反映出来，并发生一定变异，称为树种的适应性。育种中更具抗性的新种的产生及树种适应性的形成，都与一定的环境条件相联系。发育与环境间的关系成为树种研究的核心，这在生态上属于个体生态学(individual ecology)的范畴。

(一) 环境因子在森林生态系统中的作用规律

树种的发育过程自始至终都处在一个综合性的环境之中。包含于综合环境中的每一个性质不同的单因子，其质量、数量、性能和作用强度均有差异，并均对树种的发育起主要的或次要的、直接的或间接的、有利的或有害的生态作用。这些生态作用在时空上都不是固定不变的，在不同情况下，它们的作用不同。通常环境因子包括气候因子、土壤因子、地形因子、生物因子和人为因子五大类。充分认识各因子作用规律有利于指导树种研究。生态因子的作用规律主要有：生态因子相互联系的综合作用，主导因子作用，生态因子的不可替代性和可调节性，生态因子作用的阶段性等(见第二章)。

(二) 树 木 育 种

林木育种经历了古代原始的林木育种到近代传统林木育种的发展阶段。原始林木育种主要包括一些零星的引种和繁殖实践活动。传统林木育种在 50 年代基本形成了较系统的理论体系，广泛应用于林业之中，种源实验、造建优种园、无性系选育、杂交育种等传统的育种方法在提高木材产量和品质方面发挥了重要的作用。人类进入 21 世纪，林木育种面临新的挑战。在此情况下，应用生态学原理培育出更具适应性的树种显得尤为重要。今后，应把生态学和育种学有机结合起来，根据树种的生物学特性，在一定范围内以不同的生态条件、栽培条件，开展适应性、区域性研究，并不断培养出符合不同生态区域特点的区域化生态品种，这是生态育种的必然发展方向。

1．林木育种中的单因子分析

依据树种的生物学特性，对树种将要生长的生境作单因子分析是做好育种工作的第一步。

(1) 温度

温度是生存环境条件中最不易进行人工调节的主要因子，因此它往往成为某一地区育种中起决定性作用的限制因子。首先，地球表面上各地的温度条件随纬度和地形的不同而有很大变化，因而决定了相应的树种只能分布在一定的热量带内。如杉不过淮水， 樟不过长江，马尾松北界不过华中区主要是受气候带的控制。其次，育种时要了解树种所能忍受的最高温度和最低温度。树木的种子只有在一定的温度条件下才能萌发，若超过了种子萌发的最适温度会引起萌发速度下降，达到最高温度时萌发停止；温度对树木的生理活动也具有限制作用，树木的生理活动只在一定的温度范围内加强，越过了这一范围生理活动速度减慢。阴生植物生长在荫蔽处，温度较低且直射光少，最适温度处在 10~20℃之间；早春和高山植物只在一个季节或平均气温低的地区生长，故最适温度与阴生植物相同；温暖气候下的树木最高光合生产力适宜温度在 20~30℃之间；分布在高山和极地地带的树木，能够适应那里极端不良的寒冷气候。最后，有效温度期也是影响育种的一个限制因子。中纬度地区的树木一般有较长的冬季休眠期，这是中纬地区的树木对经常出现的不稳定气候特殊的适应性，而高纬度地区的树木则不具有此特

性。若将高纬度地区树种引种中纬度地区，常常会因初春温度的不稳定性(转暖)而萌动，随后一旦寒流袭来就会遭到冻害。

(2) 光照

首先，各树种对光强度都有一定的适应范围。树木的开花结实必须要有充分的营养积累，充足的阳光有利于林木的营养积累，也有利于花芽的形成，因而树木的开花结实必须有充足的光照条件。得不到充足光照条件的树木或进行无性繁殖或生长失常最终死亡。其次，光照时间的长短也是一个影响因素。南方的短日照树种在北方育种或北方的长日照树种在南方育种，均由于日照时间不能同步而影响其生长发育，尤其是对光周期敏感的树种。南方的苦楝引入北方由于秋季不能正常结束生长，枝条不能木质化而难以安全越冬。最后，太阳辐射中各种不同波长的光对植物具有不同的光化学活性及刺激作用。不同海拔之间太阳辐射的光质也存在一定的差异。高山植物能适应丰实的紫外线而低山植物则不具有此特性。

(3) 水分

地球表面的降水随纬度与地形的变化而变化，决定了相应的树种只能生长在一定的区域内。在干旱地区育种必须选择具有耐旱性的树种。在干旱的草原地带往往由于水分条件不能保证树种生长的需要，成为树种发育的限制性因子。降雨的强度和降雨的持续时间及降雨的发生时间都与树种的发育具有密切的关系。降雨不多的区域树种会由于缺乏水分而落花、落果，降低种子质量；降雨发生在花期影响开花传粉；降雪过多会引起雪压、雪折、雪倒等灾害。

(4) 土壤

土壤的酸碱度因土壤而异。树种不同，适合其生长的酸碱度的适应范围不同。有些树种由于对土壤酸碱度不适应常常会导致死亡。育种时必须注意这一点。

土壤中养分元素不同，适合生长的树种就不同。了解树种对养分元素的适宜性也是育种中不可缺少的环节。不同树种对土壤中各养分的吸收情况也不同。土壤中的微生物在促进或抑制树种对养分的吸收方面起巨大作用。如林木对氮的利用只有通过固氮微生物的作用才能将大量游离态的氮变为化合态氮，为树木吸收利用，否则树木会因缺氮而死亡。

2. 树木育种中诸因子的综合分析

影响育种工作的各因子关系错综复杂，育种中必须对各因子作综合分析。

(1) 生态因子与树种生长发育的节律同步协调

首先，树种生长发育的规律及其生物学特性统一于生境内各因子之中，而各因子又综合作用于树种的发育。树种发育的过程中，各阶段都有相应的必不可少的生态因子互相配合、互相协调，使树种统一于生存环境之中，而各生态因子又能充分满足树种发育的需要，两者紧密结合，使树种适应性增强，适应潜力范围扩大，达到满意的效果。其次，生态因子的分配规律与树种生长规律相协调。例如光周期节律性变温，降水季节等均应与树种本身的生物学特性相一致，使得树种在各个发育阶段中所需求的各个生态因

子均能得到满足。

(2) 生态因子的补偿作用

各生态因子对育种树木还存在补偿作用。山东胶东半岛引种杉木，那里的温度与南方杉木产区相差很大，但由于降雨量较少，对温度起到补偿作用，从而获得成功。

(3) 主导因子分析

树种发育的每一个阶段，都有一个或几个起主导作用的因子。育种时根据具体情况具体分析各阶段起作用的主导因子。同时必须认识到有时起作用的主导因子不止一个，而可能是多因子的。

(三) 树种的适应性

适应是各种植物生存的基本条件。不适应环境的植物就不能生存下来，也得不到发展进化的机会。各树种的遗传生态模式是该种对环境因子产生的适应性的反应。同一树种由于所作用的生境不同，一般都会显示出对生境适应性的反应。

1．树种对光因子的适应性

树种不同，对光的需要量和适应范围也不同。有些树种只能在强光环境中才能正常生长发育，而另一些树种则只需在弱光条件下就能生长良好。我们把树种适应弱光能力称为树种的耐阴性。根据树种耐阴的程度，又将树种分为三类：在阳光充足的条件下才能正常生长的树种称为阳性树种。该类树种不能忍耐庇阴，因其不能正常完成更新过程，如落叶松、油松、侧柏等。在庇荫下能正常生长的树种叫阴性树种或称耐阴性树种。它们能耐庇阴，在林冠下可以更新，有些强耐庇阴的树种只有在林冠下才能完成其正常的更新过程，如云杉、冷杉、紫杉等。介于二者之间的树种称为中性树种，这类树种一般随年龄和环境条件的不同，表现出偏阴或偏阳性特征。大多数树种属于此类。树种对光的这种适应性，是由其内在的生物特性和外在环境因素结合作用的结果。

长期生长在郁闭林冠下的植物开花很少或不能开花，很多林下植物实行无性繁殖或者上层林木落叶期间进行开花，都是植物对光照强度的适应性反应。光因子对树种的叶和根的形态结构都有较大的影响。例如同一植物为了适应不同的光照条件往往在叶的形态结构上产生与光照条件相适应的变异(表 4-3)。

表 4-3　树木阳生叶和阴生叶在形态结构上的主要区别

观察项目	阳生叶	阴生叶
叶片	厚而小	薄而大
角质层	较厚	较薄
叶肉组织分化	栅栏组织较发达或多层	海绵组织较韧
叶脉	密	疏
叶绿素	较少	较多
气孔分布	较密	较稀

引自河北农业大学　1985

2．树种对温度因子的适应

温度对树种的生理活动和生长发育都有一定的影响。一般南方树种的生长期多比北方长，特别是在湿润的热带地区树木常年生长。在生长季中，各树木的生长期变化很大。大多数落叶阔叶树在初霜期前结束生长，而在终霜后恢复生长，生长期短于生长季，也有一些树种发芽早而落叶晚，生长期长于生长季。这显然是树种的生长发育对温度因子的适应性反应。

树种的抗寒性是指树种适应低温的能力。各树种抗寒性强弱不一，抗寒性强的树种称为抗寒树种，如落叶松、樟子松、云杉、冷杉等；抗寒性差、喜温暖气候条件的树种称为喜温树种，如油、槲栎等 。

3．树种对水分因子的适应

树木对水分因子的适应取决于各种的生物学特性和生态学特性。根据树种适应干旱条件的能力将树种分为三类。在长期干旱条件下能忍受水分的不足，维持正常的生长发育的树种称为耐旱树种。该类树种一般具有渗透压高、根系发达、叶器官不发达或有控制蒸腾作用的结构等特征，如樟子松、圆柏、侧柏等。能够生长在土壤含水量很高，大气湿度较大的环境中的树种称为湿生树种。该类树种一般具有渗透压低、根系不发达、 控制蒸腾作用的结构弱等特点，如枫杨、水松、柳等。生长在中等水湿条件下，不能忍受过干或过湿条件的树种称为中生树种，大部分树种属于此生态类型。

4．树种对大气因子的适应

大气污染指大气中人为排放的有害物质达到一定的浓度并持续一定的时间，破坏了原来的物理、化学、生态的平衡体系，并对人的健康、生物的生长、正常的工农业生产和交通运输发生危害的现象。对于大气污染，许多树种在长期适应的过程中形成了顽强的抵抗力。树木较长时间生活于一定浓度的有害气体中，树叶基本能达到全绿，或虽出现落叶、落花现象但再生能力很强，数天后新叶再度萌发称该树种为强抗烟尘性树种， 如银杏、杜松等。有些树种很难较长时间生活在一定浓度有害气体污染的环境中，或大量落花、落叶，或短期内大量死亡，如油松、白桦等，称为弱抗烟尘性树种。介于二者之间的中等抗烟尘性树种能较长时间的生活于一定浓度的有害气体中，但出现较严重的受害症状，如沙松、樟子松等。

5．树种对风因子的适应

树种适应风力的能力称为抗风性。主根发达，强风下不易发生风倒的树种称为抗风树种，如松、榉等。有些树冠浓密的浅根性树种易受风倒之害，称为易风倒树种。此外， 风对树木的生长发育也有一定的影响。如经常风向单一的地区整株树木或偏冠或树冠集中于树干的一侧。再如长期生长在强风地区的树种都有旱生的特点，是树木对蒸腾失水的适应。

6．树种对土壤因子的适应

树种长期在不同的土壤条件下生长，对土壤的酸碱度形成了一定的适应性。根据树种对不同土壤的适应性可确定不同土壤的指示树种：指示酸性土壤的树种：马尾松、三叶橡、油茶等；指示钙质土壤的树种：柏木、侧柏、蚬木等；指示盐碱土的树种：柽柳、胡杨、枸杞等。

树种适应土壤贫瘠程度的能力也是不同的。根据树种对营养元素的摄取能力把树种分为耐贫瘠树种如油松、侧柏、马尾松等，不耐贫瘠的树种如榆树、杉木等。

上述各个生态因子对树种的生态作用和树种对因子的适应关系实际上是树种发育过程中某一性状对某一主导因子的适应。生长在同一区域的树种对同一因子的反应往往趋于相同，而同一树种对同一因子的反应在不同的区域又呈现渐变的趋势。例如，生长在偏北地区的树种在遗传上适应了同一光周期，可以在当地的寒冷或干旱等特定环境因子达到极端前进入休眠状态。而生长在高海拔的树种由于严霜出现较早，比低海拔的树种早一些停止生长。当树种表现为对综合环境条件的适应时，不同树种在相同环境条件下往往形成相同的适应方式和途径，从而使不同树种在外貌、内部生理和发育上表现出一致性和相似性。同一树种的不同个体在不同分布区长期接受不同环境条件的综合作用，在不同个体间表现出变异性。

二、林 分 研 究

自然界由于各地域环境条件的差异和植物种类适应性的不同，在一定自然条件的地段，总是由一定的植物种类结合在一起，成为一个有规律的组合，这样一个组合称为森林群落(forest community)。特定的森林群落是长期历史过程中植物、动物和各种生境因子相互作用的产物。一个森林群落内部包含许多不同的种群。各种群具有许多不同的数量级、年龄级和密度，并且占有不同的地位和空间，起着不同的作用，彼此发生一定的相互关系，构成森林群落内部的结构和功能。不同森林群落有它自己的形成发展过程。森林群落的形成和发展是植物群落和环境相互作用的结果。群落在发展变化过程中不断地适应并改造生境，使生境有利于群落自身发展，当群落中能量流动和物质循环达到动态平衡时，说明群落内有机体及其生境构成的森林生态系统通过一定的调节机制达到了平衡状态。

林学上根据林木的特征，将森林划分为一定的林分(stand)，每个林分的林学特征相同或其本相似，而且与周围其他林分有显著差别。林分是与一定类型的森林群落相对应的。可见对林分的研究在生态学上属于群体生态学(community ecology)的范畴。

(一) 林分研究中的生态分析

1．种群的生态分析

(1) 种群密度

种群密度(species density)是种群的主要特征之一。密度过高或过低都可能成为种群

发展的限制因子。在一定的生态系统中，种群密度有一最适值。在最适密度(optimum density)下，该种群的生产力最大。树种之间过于密集，个体间枝叶交错重叠，各自占有的空间太小，结果导致树种受光不足、营养不良、生长细弱；树种之间过于稀疏，则往往侧枝粗壮、下粗上细、干形不良且林内杂草丛生。

(2) 种群生态位与种群竞争

种群在一个生态系统中，都有自己的生态位(niche)，反映了种群对资源的占有程度及种群的生态适应特性。在一个森林群落中，组成群落的多个种群，它们的生态位不同，但可以相互重叠，有利于相互补偿，充分利用各种资源，以达到最大生产力。但生态位重叠越大，种群之间的竞争就越激烈。所以只有当组成群落的各种群能相互补偿、 相互促进、避免偏害和互害组合时，群落最稳定，趋于顶极群落。林冠上、下层树种在耐荫性上互相配合，即充分利用了太阳能，又保持了林分的稳定结构。

(3) 物种多样性、边缘效应

物种的多样性(species diversity)是生态系统的重要特征。退化的系统在恢复过程中， 物种多样性一般是增加的。这样可以增大系统的稳定性，使系统朝良性方向发展， 最终趋向地带性顶极类型。原生的常绿阔叶林遭到干扰而难以恢复时，马尾松种子入侵成林。成林的马尾松多样性比阔叶林大大降低，在这种退化系统中，实行马尾松与阔叶松混交林可以增强林分的稳定性。

在两个群落或生态系统的过渡区，由于两个群落有向外扩展的趋势，生物的多样性、种类均高于群落内部，生产力也较高，这一现象就是边缘效应。近年来迅速发展起来的森林界面学就是对这一原理的应用，有助于解决森林资源匮乏等问题。

2．群落的生态分析

(1) 群落结构

自然群落经过长期的历史发展形成了独特的最优的结构体系，从而保证充分利用各种资源，以达到最大生产力。这种结构的最大特点是垂直成层现象(vertical stratification)。森林群落一般有三层：乔木层(tree stratum)、灌木层(fruticose stratum)、草本层(herb layer)，各层又可分化成亚层。这种结构有利于植物充分利用光能、空间和大气资源。地上成层现象必然反映到地下，形成地下成层现象。由于不同植物根系深度和结构不同，地下层次也很分明，有利于植物充分利用土壤中的营养成分和水分，增强生态系统的功能和抵抗力，提高系统生产力。成层现象也为系统中的动物创造了生态环境，使动物多样性提高。

(2) 群落演替

任何群落都处于不断变化之中，其中最重要的发展变化是群落的演替。演替是有规律性和方向性的，它与气候、土壤、地域、地貌等密切相关。演替中物种及其组合发生明显变化，这些变化使得群落向着多样性、复杂性增强及系统稳定性、生产能力增强的方向发展，最终发展为顶极群落(climax community)。掌握群落的演替规律对于森林的采伐更新、次生林的抚育利用、石质山区的造林等均具有重要的意义，且对于退化的森

林生态系统的重建也具有十分重要的指导作用。

3. 生态系统的生态分析

稳定的生态系统一般具有较复杂的组成成分和食物网结构，以及物质循环和能量流动关系。这种结构关系处于协调一致的状态，从而维系着生态系统的平衡。森林生产力的提高，通常是由于对生态系统增加了一些能量，从而提高了光能利用效率。了解了这一点，在人工林中营造高光合效能的速生树种、树种合理混交及采用机械整地、灌溉、排水、施肥、抚育等手段和途径，才能提高林木合成有机物的数量和速度，对林业增产起到非常重要的作用。

(二) 森林群落结构研究

1．森林群落的组成

天然林中，群落的种类组成和群落的结构复杂程度有密切的关系，而环境条件是制约二者的最根本的原因。良好的环境条件能满足不同生态要求的植物生存，从而植物的种类组成多，产生多样的种间关系，群落的结构复杂而稳定，生物产量高。反之，生物产量低。

群落的种类组成在一定情况下可以反映出群落的性质。以我国亚热带阔叶树种为例，群落乔木层的优势种类总是由壳斗科、樟科和山茶科植物构成，在下层由杜鹃花科、山茶科、冬青科等植物构成，栖息于常绿阔叶林中的动物以两栖类、爬行类动物为主。组成群落的种对综合环境条件具有适应性，从而在外貌上反映出一定的特征。可见，研究和分析群落的种类组成不但有利于认识群落的区系成分、树种特性、经济价值和经营措施，而且在群落结构和类型划分上也非常重要。

组成群落的种由于自身的生态习性的差异，从而在群落中表现为各种数量的差异。 这种差异在林学上用多度(abundance)、密度(density)、优势度(dominance)和频度(frequency)来表示。多度是群落内个体的数量，密度是单位面积上的数量。林学上的优势度用林分的郁闭度(crown density)(树冠垂直投影面积与林地总面积的比值)或林木的胸高断面积表示，频度则可反应更新树种和下木在群落中的分布均匀情况。了解群落的数量特征有利于科学地评定植物在群落中的重要程度和群落的利用价值。

2．森林群落的结构

(1) *森林群落的空间结构*

成层现象(stratification)是森林群落垂直结构的具体表现。在森林中，由于上层林冠对光的阻挡作用，使林内光强减弱，光质、温度和湿度及林内小气候均发生明显的变化。具有不同生活习性的植物生活在适宜于各自生存的层次中，形成森林群落的地上结构(图 4-3)。一般将森林群落的地上层划分为：乔木层、灌木层、草本层、地被层。森林群落的地下层由于土壤水分、养分和盐渍度等土壤性状不同，使得植物的地下器官、根系和根茎等在土壤内垂直空间中分布。通常地下成层现象表现为乔木层根系分布最

深，灌木层较浅，草本层最浅并常局限于土壤的表层。

林学上，从林相的角度将森林分为单层林和复层林。只有一个乔木层的森林称为单层林，有两个以上乔木亚层的森林称为复层林。单层林多为人工林。天然林中，阳性树种形成单层林，阴性树种形成复层林，二者混交形成异龄复层林。森林群落中，还有附生植物(epiphyte)、寄生植物(parastic plant)、藤本植物(liana plant)，它们不单独形成层次，而是依附于其他层次之中，称为层间植物(interstratum plant)。这些层间植物在影响群落组成，反映群落性质方面具有很大的作用。

稳定群落中具有垂直结构的各层次处于相对的平衡状态，但这种平衡并不是一成不变的。因为不同的树种，对环境的适应能力和对水分、阳光等营养物的竞争能力不同，往往会导致这种平衡的破坏，促使群落的垂直结构发生变化，从而建立新的平衡。例如，在发育良好的森林内，如果上层乔木被破坏，必然导致林内环境条件的巨变，依附于上层乔木的下层植物也就大量消失。掌握不同林分的生态变化，对森林的更新、发展、稳定有重要的意义。

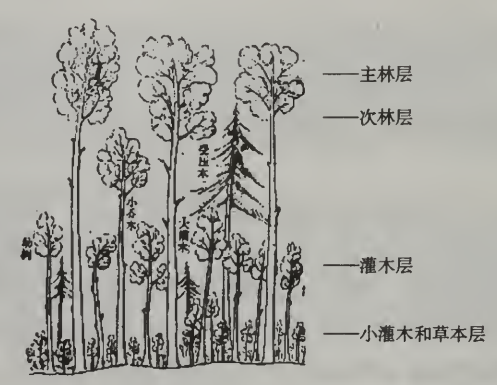


图 4-3　森林垂直结构分层示意图引自(东北林学院　1989)

(2) *森林群落的年龄结构*

森林的年龄结构(age-distribution)指组成森林的主要树种的林木在年龄阶段上的分配情况。林学上多采用龄级的方法来表示。如针叶和硬阔叶树种 20 年为一龄级，软阔叶和矮林 10 年为一龄级，速生树种 5 年为一龄级。森林中把彼此年龄相差不超过一个龄级的称为同龄林(even-aged forest)，把超过一个龄级的称为异龄林(all-aged forest)。天然混交林由于各树种耐阴性和更新过程不同，多为异龄林。若有同龄林出现，也往往是处于过渡阶段，不稳定。

3．森林群落的植物种间关系

组成某一特定森林群落的生物因子处在同一生存空间。这样一组生物因子的组合不是偶然的，而是经过漫长的进化过程相互适应的结果。它们之间在利用环境能量和物质的过程中形成了极其复杂的关系。树种的组合和树种密度是导致森林植物间发生作用的直接原因。从树种间植物相互作用的表现形式看，一般归纳为以下几个方面。

(1) 机械作用方式

多发生在林木密度较大的林分内。表现为相邻的不同树种之间树冠、树干、根系部分地或全部地紧密挤压、撞击，从而造成摩擦，随着进一步发展，两者可能相互连接，长成一个整体。根连生是指不同树种根系相连。根连生发展到一定程度后，树种便开始互相交换营养和水分，发育健壮的树种通过根连生吸收发育衰弱的树种中的营养成分，从而导致后者生长衰退或死亡。密度并不是造成机械作用的惟一原因，种间关系有时也可导致植物间机械作用。在针阔混交林内，阔叶树树枝较长而又具有弹性，受风作用时，阔叶树树冠便对针叶树树冠产生摩擦，使针叶树的叶、芽乃至幼枝受到伤害，导致树种更替推迟。某些藤本植物和附生植物依附于乔木和灌木为其生存创造条件，这种作用方式是热带雨林中一大显著的特色。

(2) 物理作用方式

有些树种可在其周围形成特殊的辐射场、电磁场、热场等，从而对相邻树种的生长发育产生影响。

(3) 化学作用方式

有些树种的地上部分和根系在生命活动中能分泌出挥发性物质，直接或间接地对一定范围内别的植物产生促进或抑制作用。刺槐树皮分泌的一些挥发性的物质能阻碍多种草本植物的生长；黑果红端木与白蜡槭在一起生长时，二者的植株高度均会有显著增加；苹果、梨、一些豆科植物能从果实、种子和枝中游离出气态乙烯，使周围植物形成汁性、枯萎、提早落叶、促进成熟等。有些树种凋落物的分解产物也可对一定范围内的其他植物产生促进和抑制作用。如云杉和山毛榉的死地被物中含有一些能抑制云杉和松属种子萌芽和幼树、幼苗生长的物质；英国栎的落叶有利于其他森林植物种子的萌发和继续生长。

(4) 生理作用方式

无论是寄生还是共生，各自发生相互作用的不同种之间都存在着直接或间接的营养物的交流。在热带和亚热带森林的第一层和第二层的较高大乔木的枝条和分枝上，经常会看到具有明显垂直分布的桑寄生科的寄生现象。它们具有惊人的繁殖力和强大的生命力，并对寄主产生极其不利的影响。在温带森林，一些常见的寄生植物寄生在柳、杨等树种上，使幼树受到伤害。

(5) 生态作用方式

森林中阳性树种形成密集的树冠，为林下耐阴树种及苔藓植物创造良好的生存条件，而林下苔藓层又能为林木的种子萌发提供必需的水分。又如在针阔混合林中，阔叶树落叶量大，枯落物易于分解，养分含量大，因而能改善土壤的肥力状况，从而给针叶树创造良好的生存条件，而云杉、冷杉、松属树种的凋落物形成粗腐殖质，恶化土壤的理化性质，抑制周围树种的生长。这种生态作用方式均是通过树种间相互改变各自的生存环境，如小气候、土壤肥力、水分条件等，或改变营养物供给状态来实现其相互影响的。

4．森林群落的动态和演替

任何森林群落都不是一成不变的，而是随着时间的推移处于不断的变化和发展之中。森林群落的动态主要表现为森林的季相变化和森林的生长发育。

(1) *森林群落的季相*

特定森林群落由于其组成种类的物候变化，使得群落的外貌随季节的变化而变化，我们称为群落的季相(aspest)。群落的季相是群落随时间变化对环境的一种适应形式。如温带地区四季的变化明显，故森林群落的季相更替分为四个显著阶段：① 春季季相。各种树木开始发芽、抽叶。② 夏季季相。植物进入生长旺季，整个群落呈现出浓绿色。③ 秋季季相。树种的叶子在落叶之前由浓绿逐渐变黄、变红，群落的外貌较鲜艳。④ 冬季季相。树种落叶并进入休眠期，整个群落呈现出一片光秃和灰色。

季相变化能引起群落在结构上的变化，因此有时也将季相称为群落在时间上的成层现象。例如北方早春的落叶阔叶林，乔木树种尚未长叶，林内光照充足，林下有春季开花的草本层，到了夏季乔木生叶，林内蔽荫，开花的草本层消失。森林群落的季相变化还能引起群落内动物的种类及其活动的变化。如偶蹄类动物在寒冷的冬天多栖息于混交林，而在夏季则迁移到高山地带的落叶松和岳桦林中。

(2) *森林群落的发育*

林学上，根据林分生长发育变化，林木相互间的竞争，林木与环境间关系的变化将森林生长发育概括为 6 个阶段。

1) 森林形成时期。在森林形成初期，幼树地上部分分散生长，个体间无明显的影响。这种单独生长的幼树个体单独和环境发生联系，对不利的环境条件不具有抵抗能力，且容易受到同一生境条件下杂草和灌木的干扰性竞争。幼树地下部分的生长速度远快于地上部分的生长速度，因而在这一阶段根系的发育充分与否，对决定幼树成活具有十分重要的意义。总的来说，该阶段群落的种类成分极不稳定，结构尚未定型，群落与环境之间的关系也不明显。

2) 森林速生时期。幼树经过一段时间的生长和对环境的适应后，生长速度加快，树冠相互衔接，林分进入速生时期。在这个时期，林木的树冠开始进入郁闭，并形成明显的树冠层，整个林分的高度在较短的时期内迅速提高。高度郁闭的林冠导致林下植物种类显著减少；高速生长的林木导致个体之间竞争加剧，林木开始出现了强烈的分化(林木为争夺生存的营养空间，在生长高度、直径、冠幅上表现出一定的差异)和自然稀疏(分化导致一部分生长衰弱的林木死亡，从而使林木株数减少)的现象。

3) 森林的成长时期。经过速生的森林，外貌和林分结构已大体成型，高生长已趋缓和，直径和树冠生长达到最佳点，林木的材积生产量也迅速增加。较为缓和的自然稀疏在这一阶段仍在进行。

4) 森林的近熟时期。林冠继续郁闭，林木间的竞争缓和下来，自然稀疏基本停止。林木内天然更新的幼树增多，下木和草本的数量也增加。

5) 森林的成熟时期。郁闭的林冠逐渐疏开，林木间的竞争仍在日趋缓和。群落内的组成相对均匀而稳定，群落结构已基本定型，主要层次分化明显。群落内植物环境具备了较典型的特点。

6) 森林的发育末期。林木开始衰老，结实能力和种子质量都已下降，林木生长停止，林分内生理衰老和病虫害现象加剧，林内幼树生长迅速，群落将产生更替现象。

群落的形成和发育的各个阶段并不具有绝对的界限，一个群落的发育末期孕育着另一个群落的发育初期。分析群落的具体生长过程有利于进一步分析群落演替，并且对造林、营林过程具有重要的指导意义。

(3) 森林群落的演替

在一定的地段上一个森林群落依次被另一个森林群落所代替即为森林演替(forest succession)。引起群落演替的主要原因是群落的组成成分和群落的生境发生了矛盾。其实质是由于火灾、采伐、开垦、病虫害、风灾、冰川侵蚀、大气候的变迁等外部因素使得森林中的优势树种不再适应变迁的环境，从而产生群落的演替。

1) 森林群落的演替模式。森林群落的演替模式是多种多样的，在不同的气候和不同的生境下，演替模式可能存在着显著的差别。

① 森林群落的原生演替模式。在原生裸地上发生的演替称为原生演替(orimary succession)。森林群落的原生演替一般从旱生演替系列(xerosere)和水生演替系列(hydrosere)两个方面来说明。

第一，旱生演替模式。地衣群落阶段：岩石表面首先出现的是地衣，它们能利用短时期的少量水分生长， 并能长时间的休眠；它们能分泌有机酸腐蚀岩石，为土壤的形成提供条件；它们的残体也可参加土壤的形成。

苔藓群落阶段：在少量的土壤上，一些耐干旱的苔藓开始生长，他们积累了大量的有机质和矿物质，使得水分和土壤条件有了进一步的改善。

草本群落阶段：在有了一定厚度和保水能力的土壤上出现了耐旱的一年生草本植物，随后是多年生草本植物定居，此时土壤温度、水分等条件都有好转，土壤中的生物增多。

木本群落阶段：在草本群落中首先出现了耐旱阳性灌木，其次是耐旱的阳性树种， 并逐渐成林。林下出现耐荫的树种，逐渐代替先锋树种，向比较稳定的群落过渡。

第二，水生演替模式。沉水植物群落阶段：它们是首批侵入水底的大型植物。当湖水深大约 1~3m 时，这些扎根湖底的沉水植物，导致非可溶性碳酸盐和粉砂沉积，且他们的腐败物也可产生类似于污泥的沉积物。

漂浮植物群落阶段：水深 1m 时，浮叶扎根的漂浮植物在水面形成被盖，以至于沉水植物由于受光不足而处于不利地位，沉水植物的残体进一步在湖底积累，湖底进一步抬高。

苇塘阶段：体积高大、枝叶茂密、根系发达的芦苇对泥沙的阻留能力更强，残体积累更多，水变得更浅。

荒草草甸阶段：当池塘变为季节性积水时，一些苔草植物侵入。如气候干旱，则发展为草原；如气候湿润，则发展为疏林。

疏林阶段：一些耐水湿的灌木、乔木出现，它们繁殖快，淤泥积累多，并大量蒸发水分，使地下水位降低并使地面庇荫，草甸植物消失。

中生森林阶段：先锋阳性树种入侵定居，土壤肥力较高，随后中性和耐阴性树种逐渐入侵，群落趋于稳定。

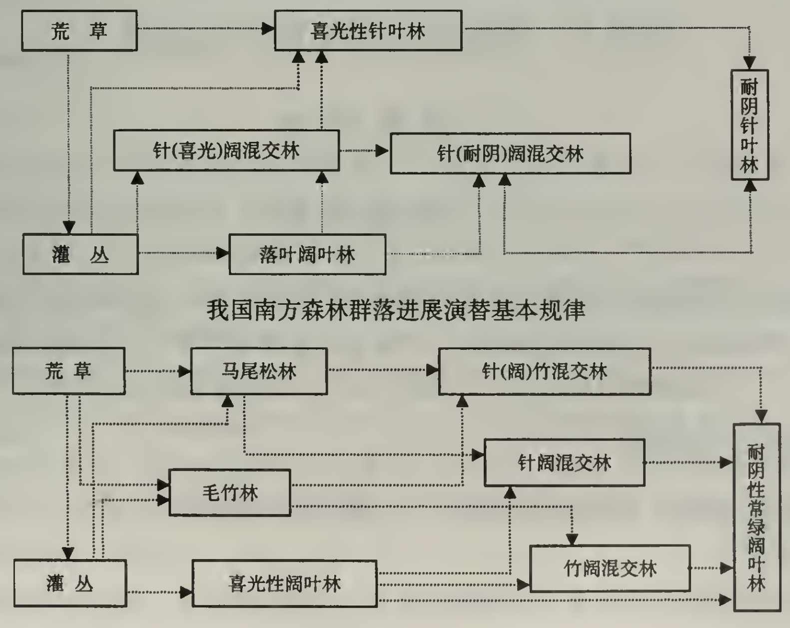
② 森林群落的次生演替模式。次生演替包括群落的退化和复生。群落的退化指原生群落在人为破坏或自然灾害之后，破坏了原有群落的稳定性，取而代之的是结构简单、稳定性差的群落。演替的复生是指次生演替总是趋向于恢复到受破坏前的原生植被状态这样一个恢复的过程。由于造成次生演替的原因是多种多样的，从而次生演替的模式也是多种多样的，如火烧演替(fire succession)、采伐演替(logging succession)、放牧演替(grazing succession)、弃耕演替(abandoned field succession)等等。我国东部山地广大次生林由于受到破坏后而发生次生演替。下面是黑龙江省东部山地次生林的演替模式(图4-4)。



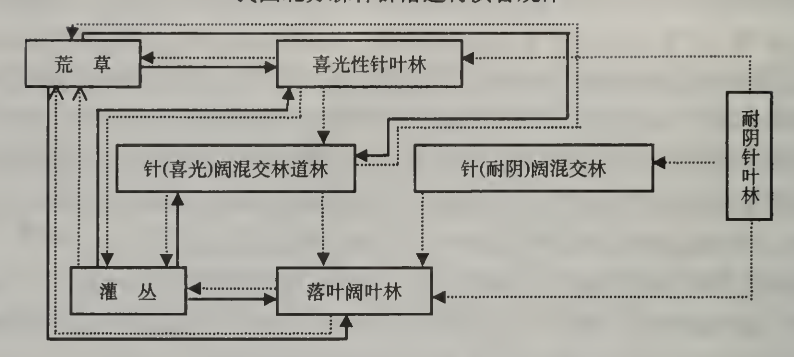
图 4-4　次生演替模式图

2) 森林群落演替的进展与逆行。无论是水生演替还是旱生演替，按照森林演替的性质和方向可分为进展演替(progressive succession)和逆行演替(reprogressive succession)。森林的进展演替指在未经干扰的自然状态下，森林群落从结构简单、不稳定发展到结构复杂、稳定阶段。后一阶段比前一阶段更能充分利用环境，改造环境。而森林的逆行演替发生在人为破坏或自然灾害过后，这些干扰因素破坏了原有群落的稳定性，取而代之是结构简单、稳定性差的群落，利用环境和改造环境的能力相对较弱，甚至退回裸地。下面是我国森林群落进展和逆行演替的基本模式(图 4-5)。

对于森林的经营管理来说，了解森林从裸露的生境到稠密的森林的各个具体演替阶段并不重要，重要的是要了解从一种林型发展到另一种林型的演替阶段。所谓树种更替具体讲是从先锋树种的定居开始，以后由于环境的改变有利于其他树种，因而被其他树种更替。从上面的几个图，可以总结出：先锋树种属于阳性，第二阶段的树种属于中性，最后的演替森林属于耐阴性。再以小兴安岭灌木红松林为例，当森林群落遭到破坏以后，环境恶化，林地裸露，光照加强，原有的耐阴树种和草本植物大部分死亡；阳性树种桦木和山杨等每年大量结实，并以种子轻、传播远的特点，迅速占领裸地进行更新；幼苗生长快，抗霜冻，耐日射，适应性强，很快形成群落，实现定居。当杨、桦林形成之后，使原来裸露的环境得到了改造，林内光强减弱，使杨、桦很难在树冠下更新，取而代之的是红松、云杉等耐阴树种。由于针叶树种的寿命长，生长高大，逐渐上升至杨、桦林冠之上，而杨、桦得不到充足的光照，使生长减弱，再加上杨、桦的寿命短，又得不到营养空间，加速了它们的衰退和死亡，最终被红松所演替。但是耐阴程度和演替阶段之间的关系并不是绝对的。某些比较耐阴的树种在演替阶段可能较早地迁入森林生境，而其他一些阴性树种或因生命较短，或因不能到达上层林或不能在上层林环境条件下存活，可能永远也不能组成演替的主要树冠部分。



我国北方森林群落逆行演替规律



我国南方森林群落逆行演替基本规律

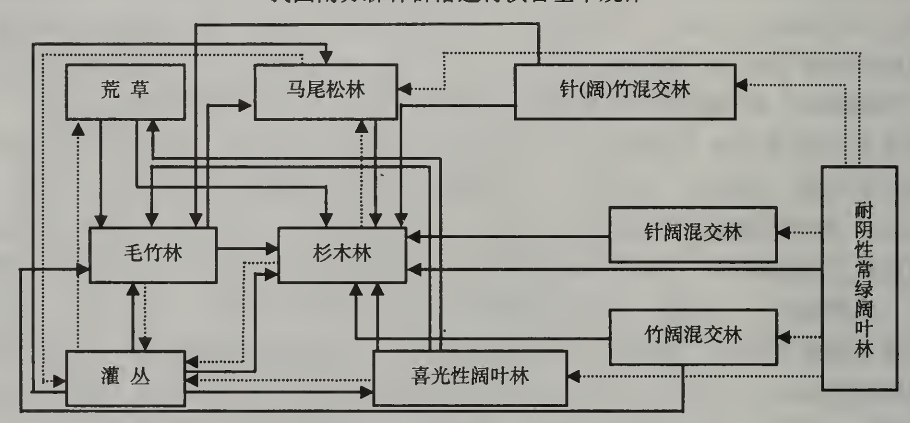


图 4-5 我国森林群落进展和逆行演替的基本模式图

第四节 森林生态系统的生态应用

一、造 林 研 究

(一) 适 地 适 树

造林地的立地条件是由多项因子综合构成的。应用正确的方法对造林立地性能进行分析，并正确选择适合立地性能的树种，才能充分发挥生产潜力，达到该立地在当前技术经济条件下可能达到的最高水平，这是造林工作中必须遵循的基本原则之一。

1．树种选择与立地条件

造林地的立地条件主要包括气候条件、土壤条件和地形条件。

(1) 气候条件

气候条件是树种分布中最重要的限制因子。在树种研究中，我们已经知道每一个树

种都有其自身的自然分布区。通常各树种自然分布区的中心是该树种生长最适宜的地区，不仅在生长量、材质、干形、抗性、繁殖能力、寿命等方面都比较良好，而且对土壤的适应性也较强。相反，愈接近其分布区的边缘则生长愈差。在气候条件中影响树木生长的因子很多，但其最主要的是温度、水分和光照。而各树种在长期自然进化的过程中形成了对上述各因子的适应性。针对某一造林地选择造林树种时，首先应考虑该树种的适应性与该气候条件的适宜程度。一般情况下，凡在一个地区天然分布且生长最普遍、最正常的即是最适合当地气候条件的树种，称之为“乡土树种”。乡土树种是选择造林树种时的首选树种。我们可以在育种中选育出更适合当地气候条件的新树种来。

(2) 土壤条件

土壤是林木根系生长的场所，它供给林木生长发育所必须的水分和养分，不同树种对土壤的要求不同。在选择树种时要了解树种生长与土壤条件的关系。具体包括：树种对水分的要求、树种的抗旱能力、树种对肥力的要求、树种对土壤酸碱度的要求。

(3) 地形条件

地形条件不直接参与林木的新陈代谢过程，但地形因子可以通过地势、坡向、坡位、小地形变化等间接地改变水热条件和土壤条件。例如，高山比低山和平原温度低、风大、 雨水多、湿度大，阴坡比阳坡日照时间短、湿度高、土壤湿润，平地则比山地暖和，而洼地易积水和起碱。

影响造林地立地性能的因子之间关系错综复杂。我们要针对具体立地，找出限制林木生长的主导因子。另外还需要分析了解一些特殊的因子。例如人为因子就是在分析立地因子关系中不可忽视因素之一。如果过度砍伐森林或过度放牧，使原有植被条件遭到破坏，则会引起严重的水土流失、土层变薄、生态环境恶化；人类的林业经营活动会影响土壤结构、孔隙度和有机物含量，土壤结构的变化又会引起土壤温度、土壤湿度和通气性发生变化。

2．适地适树的方法

(1) 选择

既包括造林地一定的前提下适树适地，又包括在造林树种一定的前提下适地适树。 实现选择途径的前提是要了解地和树的特性。对于造林地可先分析其立地条件，全面掌握立地性能，再根据造林地形对比分析小气候及土壤水分和肥力条件与造林树种对这些因子的要求和反应，然后再分析造林地的某些个别情况与造林树种在这些方面的个别要求，选出适宜的造林树种。

(2) 改地适树

为了满足树种对环境条件的需求，采取一些人为措施来改善环境条件中不适宜造林树种生长的环境因子，使之满足树种对环境条件的要求。例如，通过整地改善某些物理性质，或改善小地形使造林地更适于树种的生长，也可采取施肥、灌溉、土壤管理等措施改善造林地的生长环境。

(3) 改树适地

当地和树在某些方面不太相适应时，改变树种的遗传特性，让树种的某些遗传性在新的立地条件下发生变异，而这种变异又在新的环境条件的作用下不断地巩固和加强， 再传给后代，表现出新的稳定性，使之适应造林地的环境条件。

(二) 树种密度配置

造林密度是形成一定林分群体结构的数量基础。密度是否适宜将对林分的生长发育、生物产量和质量有很大影响。在造林时充分了解密度的作用规律，使林分形成一个合理的群体结构。这个群体结构既能使各个体有充分发育的条件，又能最大限度地利用空间，从而达到培育速生、丰产、优质的人工林的目的。

1．合理确定造林密度的意义

(1) 合理密植有利于林分郁闭

造林密度对于人工幼林进入郁闭时间的早晚起决定性的作用。造林密度越大，林分郁闭越快，反之林分郁闭慢。幼林郁闭是林分形成的关键阶段。幼林郁闭前，单独生长的幼树是不稳定的，极易遭受杂草、干旱、病虫等危害。幼树郁闭后，一方面林木群体开始形成，增强了对外界不良环境的抵抗力；另一方面森林生态环境的形成为林木的生长发育创造了条件，幼树生长渐趋稳定。如果造林密度过小，林分长期不能郁闭，林中光、热、水分、养分不能被林木充分利用，造成杂草丛生。尤其是对于竞争力较弱的树种，如果长期不能郁闭，则很难再有成林的希望。如果造林密度太大，林分过早郁闭， 会使树冠发育受到限制，影响光合产量，从而影响林木生长量。尤其是阳性速生树种，过早郁闭，林木个体间竞争激烈，林木分化明显，降低林分生长量。因而控制适宜的造林密度对幼树郁闭时间具有重要意义。

(2) 合理密植可以增加单位面积林木产量

在幼林郁闭前，林木个体间相互关系不太密切，各林木个体均有充分的营养空间， 无论是林木的胸径生长，还是林木的冠幅生长都不会受到对营养空间竞争的威胁；林分进入郁闭之后，林木之间开始发生激烈的生存竞争。密度太大的林分，各林木个体平均占有的营养空间较小，使林木的胸高、冠幅生长受到限制，结果是使得单株材积产量减少；密度太小的林分，单位面积的株数太少。而单位面积木材产量是由单位面积的株数和单株材积产量决定的。实践证明：在幼林阶段，单位面积上的林分蓄积量随密度的增加而增加，到达林分发育后期，单位面积上的林分蓄积量随密度的增加而减少。但对于具体树种而言，株数与单株材积的消长关系并不一致。对于一些阳性树种，单位面积上株数起主导作用的时间较短，对于一些阴性树种，单位面积上株数起主导作用的时间较长。 在人工林的培育中必须针对树种特性和经营目的，不断地调整密度和单株材积的制约关系，从而使单位面积的材积量最大。

(3) 合理密植可以提高林木质量

造林密度对林木质量影响较大。不同密度的林分，其材质也不尽相同。一般来

说，林分密度小，林内光照充分，侧枝发达，节子多，会降低干形。林分密度大，林内光照缺乏，林冠的横向扩展受限，植株迅速向高生长，并在树龄较小时便开始自然整枝，因而形成良好干形。但密度太大，又会影响产量的提高，所以合理密植既可使林木生长发育良好，又可以实现单位面积上产量最高，从而获得经济价值较高的优质木材。

2．合理确定造林密度的方法

确定造林密度要以密度的作用规律为依据，根据培育目的、立地条件、经营水平、经济条件等多方面综合论证。从生态学的角度看，确定造林密度主要考虑各树种特性和立地条件。各树种的生物学特性不同，它们的生长速度和对光照条件的要求也不同。一般根据树种的生长规律、树冠的需光程度、整枝性能、适宜的生态条件确定造林密度。实践证明：阳性速生树种不耐阴，密度过大会影响生长发育，因而必须稀植，但对于某些疏植会影响干形的阳性树种则要适当加大种植密度，并适时间伐；阴性树种和生长缓慢的树种郁闭慢、成林晚，造林密度不宜太小；树冠宽阔的树种造林密度不宜太大；树冠窄小的树种，稀植影响产量，则要适当加大造林密度。立地条件的好坏也是影响林木生长快慢的最基本的条件，好的立地条件能给林木生长提供充足的水肥，林木生长较快；贫瘠的立地条件，林木生长缓慢。因而在好的立地条件下，株行距应加大，造林密度应减少，以便于培育干形好的优质林木；在立地条件较差的条件下，造林密度可稍大些，以便于尽快形成森林环境，促进林分的稳定性。

(三) 树种种类组成

按树种的种类组成将人工林分为纯林和混交林。从生态学的角度看，纯林由单一树种组成，林分结构单一，林分稳定性和抗性较差。混交林由多个树种组成，林分结构复杂，林分的稳定性和抗性都较好。如果在营造混交林时，能够合理选择混交树种，必然可以取得明显的生态效益、社会效益和经济效益。

1．培育混交林的意义

(1) 能充分利用营养空间

树种不同，对土壤营养物质的要求不同，根系在土壤中分布层次不同。将根型不同的树种搭配在一起，使根系在土壤中合理分布，充分利用土壤中各层的营养物质，如深根型和浅根型的树种混交，也可将嗜肥性不同的树种混交，可以充分利用土壤中的各种营养物质，发挥土地的生产潜力。根据树种的耐阴性营造混交林，可以充分利用光能，有利于各树种在不同时期和不同层次范围利用水分和营养物质，获得集约利用土地的效果，达到林木高产的目的。

(2) 维护和提高林地生产力

混交林具有保持地力、改良土壤、涵养水源、提高土壤肥力的功效。混交林积累的森林枯落物数量较多，大量的森林枯落物分解后，可以改良土壤、提高土壤肥力。由于混交林林冠结构复杂，层次较多，对雨水的拦截能力较强，可以大大减少地表径流，发

挥保持水土和涵养水源的作用。在针阔复层混交林中，由于针叶树落叶灰分少，难分解，阔叶树的落叶灰分丰富，腐烂分解容易，因此形成了松软而易于分解的腐殖质，使林地土壤疏松，吸水能力、土壤肥力增强，从而减少地表径流。

(3) 可以取得良好的效益

不同生态特性和抗性的树种混交，结构层次分明，树种组成多样，具有较好的景观和美学旅游价值。混交树种林冠多层分布，叶面积系数大，对于净化大气、防治污染、吸尘隔音、增加空气湿度、防风、固沙和美化环境都有良好的作用。直干性较差的树种在混交林中生长，伴生树种可以促进其形成通直的干形，并抑制其侧枝生长，加强了自然整枝，从而提供高大通直的良材。另外不同树种混交还有利于生产出多种产品满足不同时期、不同用途的木材需求，取得良好的经济效益。

(4) 可以增强抗御灾害的能力

混交林树种组成多样，能够形成结构较为复杂的生态系统，对不良环境因子具有较强的抵抗能力。混交林营养结构多样，有利于各种生物种类的生存，众多生物种类互相制约，抑制病虫害的大量发生。混交林对气象灾害也具有抵抗能力，如深根性和浅根性树种混交可以减轻风害，针阔叶林混交可以增强抗雪能力和对森林火灾的抗性。

2．合理选择混交树种的方法

根据混交林树种在林分中所起的作用，一般可分为主要树种、伴生树种和灌木树种。主要树种是造林的目的树种，也是林分的主要组成部分。主要树种在混交林中不仅在生物学上占优势，而且在木材蓄积或发挥防护效能等方面也起主要作用，因而必须针对造林地的立地条件选择好主要树种。混交林的主要树种可以是一种，也可以是一种以上。伴生树种是一定时期内与主要树种相伴而生，并能促进主要树种生长的乔木树种。它主要是通过改良土壤、保护土壤等作用来促进主要树种的生长。灌木树种是通过覆被地面、保护土壤、减少水分蒸发、抑制杂草生长和防止地表径流，达到改良土壤、促进主要树种和伴生树种生长的目的。混交林造林成功与否，关键在于树种配合正确与否。在主要树种确定的前提下，选择混交树种首先考虑混交树种本身要适地适树。其次混交树种与主要树种在生物学特性上无太大矛盾且混交树种在光照、高生长方面应次于主要树种并与主要树种具有不同的根型，对土壤营养条件要求不同等。另外，混交树种能最大限度地发挥其辅佐、护土和改土的功能，给主要树种创造有利的生长环境，且与主要树种之间没有共同的病虫害，混交树种更不应是危害主要树种病虫害的中间寄主。最后混交树种最好是萌芽力强，繁殖容易的树种，以利于造林。

二、营 林 研 究

(一) 抚 育 间 伐

抚育间伐(preliminary thinning)是指在幼林郁闭后到林分成熟前的一段时间内，在未成熟林分中按一定指标采伐部分林木，为保留林木创造良好生存环境的森林抚育措

施。通过这项措施，可以获得一部分木材，特别是可以对小径材加以利用，所以又称“中间利用采伐”，简称“间伐”。

1．抚育间伐的意义

抚育间伐既是培育森林、提高森林整体质量的重要措施，又是获得木材、提高森林经济效益的直接手段。在天然林中树种复杂、分布不均、年龄不一，林木之间存在着强烈的竞争。通过抚育间伐及时调整林分树种组成，逐步淘汰非经营的树种，使目的树种逐步取得优势，形成适宜的林分密度。在人工林中，虽然造林过程中已经确定了树种密度和林木配置关系，但随着林木年龄增大，林木个体所需营养面积日趋不足，竞争逐渐激烈。通过抚育间伐使林木个体形成比较合理的营养空间，促进林木营养生长，使林木培育周期缩短，总生长量增加。在抚育间伐的过程中，林分内的劣质林木被清除出去，同时在上层保留林木中一些生长不良木也被清除出去，增加了单位面积上的林木产量；在抚育间伐过程中，逐渐生产的一部分木材可在早期获得一部分经济效益，降低了育林成本；在抚育间伐的过程中，林分内的枯立木、被压木及风折、风倒、雪折木均被清除出去，从而减小了病菌、害虫侵染的可能性，林分内卫生状况大大改善，林冠下层光照强度和通风状况也大大增强，林分的生态效益大大改观；在抚育间伐的过程中，结合经营目的的采伐，使林分的组成结构多样化，林分密度合理化，使森林的各种防护功能增强，带来良好的生态效益和社会效益。

2．抚育间伐的方法

(1) 透光抚育

透光抚育在幼龄林时期进行。主要是伐去抑制主要树种生长的次要树种，改善林分生境条件，促进林木的干形成长。根据林地形状和大小，透光抚育实施方法有：

全面抚育：当主要树种占一定优势而分布又比较均匀的情况下，在整个林地上按一定的强度普遍伐除抑制主要树种生长的非目的树种。

团状抚育：当主要树种在林地上分布不均匀、数量又不多时，仅在有主要树种的聚群内砍伐抑制主要树种生长的次要树种，在无主要树种的地段不进行抚育。

带状抚育：在林地内根据气候和地形条件将林地划成若干带，一般带宽 1~2m，带间距 3~4m。在带内砍伐次要树种、保留主要树种，间隔带不进行抚育。如果间隔带上的林木妨碍带内主要树种的生长，则也应间伐。

(2) 生长抚育

幼龄林经过透光抚育后，林木的高生长、直径生长和体积生长逐渐达到一个高潮。为了解决目的树种个体间的矛盾，需不断调整林分的密度，给保留木提供适宜的营养空间，促进保留木生长，提高保留木质量，缩短保留木的成熟期，实现优质丰产。根据林木生长发育状况，生长抚育实施方法主要有四种。

下层抚育：此法主要应用于松、云杉、落叶松林等。在进行下层抚育时首先砍除位于林冠下层生长落后、径级小的濒死木和枯死木，同时也可砍伐个别严重压抑目的树种或干形不良的林木。总之，是要去除那些在林木分化上已处于劣势，在自然稀疏过程中

将被淘汰的林木。其实质是以人工方法加速了自然稀疏的过程，但没有改变林木自然选择的总方向。

上层抚育：此法主要应用于针阔混交林、阔叶混交林及复层林中。在混交林中，位于林冠上层的往往是非目的树种且通常多干形不良、分杈多节、树冠庞大、经济价值低并严重影响周围其他优良木的生长。伐除这些树木可以使留下的培养木得到充足的光照，从而加速生长。

综合抚育：主要应用于耐荫性树种组成的林分内。它综合了上层抚育和下层抚育的特点，既从上层选择砍伐木，又从下层选择砍伐木，砍伐对象遍布于林冠层的各个部位，方法较为灵活。

机械抚育：主要应用于人工林，特别是人工纯林和林木分化不明显的林分。首先，按一定的株数、行距机械地确定砍伐木和保留木。作业时，按事先确定好的株行距将大小林木一律伐除。

(3) 卫生伐

当林分突然遭受自然灾害，大量林木受到损害时，单独实施卫生伐。一般情况下，卫生伐总是结合其他抚育过程一并进行。其目的是为了维护和改善林分的卫生状况，防止森林病虫害的传播和蔓延。作业时，主要从林分中伐除枯立木、风倒木、风折木、雪倒木、雪折木、受机械损伤和生物损伤的树木、受病虫危害已无培养前途的树木等。

具体到特定的林分抚育时，可以以一种方法为主，也可以多种方法综合应用，根据具体情况，灵活使用。必要时还可以结合人工整枝和摘芽等抚育方法来促进林木优良生长。

3．抚育间伐的影响

(1) 抚育间伐对林分生长的影响

林分经过抚育采伐后，林地林木的营养面积扩大，林木直径生长加快，相应地单株体积的生长量也加快，对叶量变化影响十分显著，对树高生长也有一定的影响，但不是很显著。只有在目的树种居于林冠的第二层混交林中，抚育后消除了次要树种对目的树种的压抑，目的树种树高才能显著增加。抚育间伐对单位面积上的生长量如何影响，目前争论仍然很大。

(2) 抚育间伐对林分稳定性的影响

雪害是森林经常遭受的自然灾害之一。密度较大的林分经常大片遭受雪折，甚至有连根拔起的雪倒现象。经过抚育间伐的林分立木粗壮、根系发达、抗雪害能力加强。风害因土壤性质、树种根系分布特点、林分特征、地形的不同而异。下层抚育可以有效地防止林分遭受风害。间伐过程中去除了有害木，减少了病虫害侵袭的可能，改善了林内卫生状况，使林分生长势旺盛，抵抗病虫害能力增强。

(3) 抚育间伐对环境的影响

抚育间伐能对林分环境产生显著影响。抚育后的林分，单位面积上立木株数减

少，林冠郁闭度下降，林内光照强度增强。抚育间伐还可使林内温度发生明显的变化。夏季，林内温度随疏伐强度加大而提高，冬季则正好相反。土壤温度变化趋势也是这样。抚育间伐也可影响土壤肥力。采伐后的林分，林内小气候改变，促进了土壤微生物活动，加速了死地被物分解，增加了土壤中有效营养元素含量。

(二) 次生林经营

次生林(secondary forest)是指大面积的原始林经过采伐、开垦、火灾及其他自然外力破坏后，天然更新并自然恢复形成的次生群落。由于次生林是天然林，故又称为天然次生林。原始林受破坏以后，使得次生林的生境变得极为极端，只适合少数树种生存，因而次生林树种组成单一、林分结构单一、群落处于不稳定状态，且对病虫害的抵抗能力较弱。为了发掘次生林的多种经济效益，必须对次生林进行改造。

1．次生林改造的意义

次生林在我国分布广泛，类型繁多。合理经营改造好次生林不仅关系到我国目前的林业，而且具有十分重大的长远意义。从我国森林资源的结构来看，次生林占很大比例且生长潜力很大；从我国森林资源的量来看，目前森林资源严重不足且分布不均，因而次生林是发展森林资源的强大的后备力量。次生林树种种类繁多、生长速度较快、培育周期较短。如果能合理经营利用，可以提供具有多种用途且生长周期较短的木材，解决木材供求矛盾。另外，次生林内蕴藏着丰富的自然资源和林副产品，在发展多种经营和综合利用方面也具有广阔的前途。次生林在调节气候，涵养水源，保持水土，防护农田等方面作用也很大。

2．次生林经营改造的方法

(1) 抚育间伐

在具有培养前途和培养价值、郁闭度或密度较高的次生林内进行抚育间伐，以便于调节次生林结构，改善次生林环境，促进次生林生长，培育出优良干形的优质木材。抚育间伐的方法在前面已讲过，但次生林又不同于普通林，由于次生林阴生乔灌木较多、生长快、草本植物亦较繁茂，故透光伐应及早进行，并要缩短间隔期。经过抚育间伐后的次生林，单位面积的木材产量提高。

(2) 林分改造

在密度小、经济价值低、罹有严重病虫害、没有培育前途的次生林中进行林分改造，以便于调整林分结构，增大林分密度，提高林分的经济效益。林分改造具体包括：

林冠下改造：适合于郁闭度低的低价值次生林改造。作业时，应先清除林冠下的灌木、杂草等，然后整地造林。造林树种多为耐阴性或在幼苗阶段耐阴的树种，待幼树生长稳定后，伐去上层，为幼树成林创造良好的生存环境。

全面改造：在土地条件好、植被易于恢复、不易水土流失的地方，常生长有非目的树种占优势、林木弯曲多节、不易抵抗病虫危害、无培育前途的次生林，需要彻底改变

该林的树种组成和林分结构。改造时，除目的树种的幼树其余林木全部伐除，然后选择适合土地条件并能与目的树种共生的栽培树种造林。

局部改造：主要用于目的树种占优势、密度较小的次生林。通过局部造林，提高目的树种的密度，恢复林分生产力。一般方法是在林中空地上清除灌木，密集造林。树种选择除考虑土地条件外，还要考虑目的树种占优势，且尽可能营造混交林。

(3) 封山育林、封禁保护

树种组成基本合理，且分布均匀，生长良好，更新起来的幼树不需要抚育，也未达到采伐年龄，没有必要进行改造或需要进行经营管理但又无力经营，对这样一组次生林实行不同形式的封禁，并借助于天然更新能力辅之以抚育管理措施，逐渐恢复和改造， 从而扩大次生林面积，提高次生林质量。具体作业时，可以一次性封死，数年不许有人为活动(死封)，也可在不影响森林恢复的前提下，只在生长季节封山(活封)，还可将封山育林地区划片，轮封轮放(轮封)。在实践中，一般都是死封、活封、轮封相结合，封育相结合，乔、灌、草相结合。

(三) 森林主伐与更新

森林主伐(harvest cutting)是指对成熟林木或部分成熟林木进行采伐。其目的不仅包括取得木材，也包括采伐后保证森林更新。因而在森林采伐的过程中应严格服从森林更新的要求，使森林资源得到永续利用。采伐方式基本上可分为皆伐、渐伐和择伐三种。

1．皆伐与更新

皆伐是将伐区上的林木一次全部砍光，伐后采用人工更新或天然更新的手段来恢复森林资源。皆伐后的迹地，由于太阳直射于地表，从而形成迹地小气候。在迹地小气候的影响下，迹地植物发生变化：迹地上阳性草本与灌丛丛生、植物根系盘结、迹地土壤板实、通气性变差，直接和间接地影响了迹地更新幼树的成活和生长。

(1) 天然更新

皆伐迹地的天然更新就是依靠天然种源下种更新，形成森林。天然种源一般来自于附近林分的种子传播、采伐木的种子扩散、地被植物的种子储存。但往往由于种种自然条件的限制无法实现天然更新，因而需根据自然规律和树种特性来确定，并辅之以必要的技术措施，以保证迹地具备天然更新的三要素(足够的种子来源、适宜种子发芽和幼苗生长的林地条件、气候条件)。保证更新成功的措施一般为：

保留母树：以便于提供充足的种源；

采伐迹地的清理和整地：为种子和幼苗的生长创造条件；

保留前途幼树：保证提前郁闭成林。

(2) 人工更新

随着林业经营管理的提高，人类对天然更新的依赖程度减小，取而代之的是越来越多的人工更新。要想保证人工更新成功实施，首先要根据立地条件和树种特性适地适树

选择更新树种，其次要充分利用新迹地杂草灌丛较小、土壤疏松等特点，及时更新，最后保留并利用迹地上的大量天然幼苗成林。

2．渐伐与更新

渐伐是在较长的期限内多次将伐区上的成熟林木伐除。其目的是在采伐过程中保留木为林冠下的更新幼树、幼苗创造良好的生存条件。而保留木也在幼树全部更新之后全部采伐完毕。典型的渐伐更新过程一般有四个步骤：

(1) 预备伐

应用于郁闭度大，树冠发育较差，林木密集但抗风力弱，死地被物较厚，妨碍种子发育和幼苗生长的林分中。目的是要促进保留木结实，增强保留木的抗风力，加速地被枯落物分解，改善土壤的理化性质。作业时，要伐除病腐木和生长不良的林木，加大林冠受光面，增强林内光照，促进地被分解，为幼苗和种子发育创造条件。

(2) 下种伐

该法是疏开林冠的采伐。目的是疏开林冠，改变林内光辐射分布，种伐作业最好是结合林木种子年进行，并促使种子能均匀地散落在渐伐林地上。

(3) 受光伐

下种伐之后，林地上的幼树、幼苗逐渐长大，对光照的需求也逐渐增强。为了满足幼树、幼苗对光照的需求，进行受光伐。受光伐的对象一般为健康木。采伐作业时，要注意使林木保持均匀以便于林分内均匀透光。

(4) 后伐

受光伐后，幼树生长速度加快，营养状况良好，具有对不良环境的抵抗能力，林分已达郁闭或接近郁闭状态。此时，要及时将成熟林木全部伐除，以保证林木加速更新。

3．择伐与更新

在异龄复层林内，每次砍伐掉一部分成熟木，林地上始终保持着多龄级林木，并伴随着连续进行的天然更新，从而使更新后的林分仍为异龄复层林，这种采伐称为择伐。择伐通常是与天然更新结合，在天然更新不能保证林分顺利完成更新时，也可结合人工更新的方法促使林分更新顺利完成。增加林内透光量，扩大林木营养空间，促进林木结实，完成下种。

主伐方式确定合理与否，将对森林资源的利用和再生、森林生态、防护效益的维持和发挥、社会及经济效益的发挥等多方面产生重大的影响。因此，合理选择主伐方式显得十分重要。表4-4列出了选择主伐方式时应考虑的一些因素。

表 4-4　三种主伐方式的比较

<table>
<tr><th>类别</th><th>皆伐</th><th colspan="2">渐伐</th><th>择伐</th></tr>
<tr><td>更新方法</td><td>人工更新为主或天然更新</td><td colspan="2">天然更新为主或辅以人工更新</td><td>天然更新为主或辅以人工更新</td></tr>
<tr><td>更新后形成林相</td><td>单层同龄林</td><td colspan="2">单层同龄林</td><td>复层异龄林</td></tr>
<tr><td>更新期长短</td><td>1~10a</td><td colspan="2">10~20a</td><td>连续</td></tr>
<tr><td rowspan="4">每次采伐的百分数</td><td rowspan="4">100%</td><td>预备伐 25%~30%</td><td rowspan="2">50%</td><td rowspan="4">10%~40%</td></tr>
<tr><td>下种伐 10%~25%</td></tr>
<tr><td>受光伐 10%~25%</td><td rowspan="2">50%</td></tr>
<tr><td>后伐　全伐</td></tr>
<tr><td>采伐间隔期</td><td>3~5a</td><td colspan="2">3~5a</td><td>10~15a</td></tr>
<tr><td rowspan="4">伐区上保留的母树数量</td><td rowspan="4">无或少</td><td>预备伐</td><td>很多</td><td rowspan="4">很多</td></tr>
<tr><td>下种伐</td><td rowspan="2">较多</td></tr>
<tr><td>受光伐</td></tr>
<tr><td>后伐</td><td>无</td></tr>
<tr><td>最适宜的树种</td><td>阳性树种</td><td colspan="2">所有树种</td><td>耐阴树种</td></tr>
<tr><td>防止冲刷和杂草的能力</td><td>差</td><td colspan="2">良好</td><td>好</td></tr>
<tr><td>采伐对保留木的危害程度</td><td>差</td><td colspan="2">较大</td><td>较大</td></tr>
</table>

引自肖杨　1998

第五节　生 态 园 林

一、生态园林研究进展

18 世纪时，工业革命和早期的城市化造成了城市人口密集、与自然完全隔绝的单一环境，引起了一些人的关注。英国首先将自然引入城市，开始形成自然风景园。然而真正从生态的高度将自然引入城市的是 Olmsted。他在 1857 年规划了中央公园，1881 年又进行了波士顿公园的系统设计，意在利用城市自然景观推动城市生态的良性发展。19 世纪末，以 Simonds 和 Jensen 为代表的中西部景园建筑师开创了“草原式景园”。特别是 Jensen 首先提出了以自然生态的方法来代替以往单纯从视觉景象出发的园林设计。几年间，他先后在芝加哥园林里设计出了模拟植物自然生长、演变的自然景观，并围绕美国中西部典型的大草原风景进行研究。伊利诺湖畔占地 $24hm^2$ 的草原风格的林肯纪念园是他对研究结果的实际应用，他在这片大草原的不同地段上种植了纯种和混种的草类，这可算是生态园林的开端。第二次世界大战后，以 Shelpheard 和 Hackett 为首的一些景园建筑设计师提倡通过生态因子的分析对整体景观即植物群落的设计。1969 年 Mcharg 出版了《设计结合自然》一书，开创了景园生态设计的新时代，最新的生态学原理得以在园林中应用。到了 20 世纪 60 年代，随着人口的增长，工业化、城市化和环境污染的日益严重，生态问题成为全球关注的焦点，人们逐渐意识到要改变灰色混乱的生存环境，必须改变正在继续恶化的城市生态。90 年代德国景园设计师 Hill 针对德国圣福特堡地区长期煤矿开采造成的环境酸化问题，设计了纵横交错的林荫道网络，使得环境质量得以大大改善。生态园林在我国出现是近几十年的事情。20 世纪 50 年代初期，我国处于国民经济恢复的时期，园林建设也只限于保护、整修和维持原状，到了 60 年代，园林进入了一个“见缝插针”的较快发展阶段；70 年代提出了点、线、面结

合的绿化方针，忽视了城市绿色的重要性；80 年代总结多年的经验教训，提出了北方以天津为代表，南方以上海为代表发展生态园林城市。我国著名科学家钱学森曾提出要建设“森林城市” 这样一个观点，其实质就是要为人类建立一个具有林木花草、鱼跃鸟鸣等天然情趣的生存空间。

二、生态园林的概念和内涵

王祥荣(1998)在《生态园林和城市环境保护》一文中指出生态园林主要是以生态学原理为指导(如互惠共生、物种多样性、竞争、化学互感作用等)所建设的园林绿地系统，在这个系统中乔木、灌木、草本、藤本植物被因地制宜地配置在一个群落中，种群间相互协调，有复合的层次和相宜的季相色彩，具有不同生态特征的植物能各得其所，能够充分利用阳光、空气、水分、养分和土地空间，构成一个和谐有序、稳定的群落，它是城市园林绿化工作的最高层次的体现，是人类物质和精神文明发展的必然结果。这是从生态的角度对生态园林作了定义。总结国内外生态园林的发展过程，生态园林的内涵主要表现在以下三个方面：

1) 从生态园林的规模看，打破了城市园林绿化的狭小圈子，远远超过了局限于公园、风景名胜区、自然保护区的传统观念。就一个城市而言，相对封闭而又有限的城区绿化还不足以形成改善城市整体环境质量的效益。在整个城市的地域上形成包括城区、郊区、近郊区、远郊区在内的城乡一体化绿化建设体系，形成点、线、面、网、片的生态园林体系，逐步向国土治理发展，使之“大地园林化”，是生态园林建设在规模上的战略目标。这种大规模的、一体化的城市园林建设不仅能增加城市总的园林绿地，发挥群体效应， 而且对于扩大其总体生态效益方面作用也很明显，尤其是避免和缓解局部地区环境恶化， 保持城市总体生态环境的稳定具有重要意义。

2) 从生态园林的结构看，依靠科学的配置，建立具有合理的时间结构、空间结构和营养结构的人工生物群落。群落内的乔木、灌木、草本和藤本植物形成相宜的季相色彩，从而用丰富的观赏层次来弥补季相的缺陷，满足季季都是色彩缤纷的观赏要求。群落内树种的选择结合地形的特征和树种的结构特点，产生错落有致、参差多变、层次丰富的组成式植物结构，形成步移景异、一步一景的观赏植物群体。在群落植物配置时，以生态学原理为指导，充分考虑物种之间的关系，避免种间直接竞争，形成功能健全、种群稳定的复层结构，种间互相补充既能充分利用环境资源，又能形成优美的景观。

3) 从生态园林的效益上看，这个群落能够产生良好的生态环境效益，起到净化空气、光合作用、调节气温、降温保湿、保持水土、涵养水源、防风避灾、美化环境、休息游憩、保护文物等综合功能，同时还能提供各种原材料和生态产品。

三、生态园林的功能

生态园林不仅具有普通森林生态系统具有的功能，还有其自身优势，主要表现在：

(一) 调节城市气候

1) 改善城市热环境。现代城市是由水泥和沥青等热容量大、热传导好的建筑材料组建而成的，高大的建筑使得城区通风不良，热量难以释放，再加上人口集中、交通拥挤、人为热释放多，使得城市的气温比郊区要高，形成“城市热岛效应”。由于城市自然降水大部分为建筑物和铺装道路所拦截流入地下水道而丧失，自然降水通过非铺装地面上的植被的蒸腾向大气补偿水分的数量大为减少，又使城市过热和过干的恶性循环得以继续，形成“城市干岛效应”。一体化的生态园林植被通过其叶片的大量蒸腾水分消耗城市中的辐射热，而树木和树枝、树叶的浓荫阻挡了来自太阳的直接热辐射和来自地面、 墙面和相邻物体的反射热，从而产生降温、增湿的效应。

2) 增加城市气候舒适度。绿色植物附近的气温相对建筑物要低、湿度要大，这样就会形成自然对流，使绿地附近有气流流动，增加人的舒适感；绿色植物具有风屏的作用，高大的植物能有效地阻拦室外空气向室内流动，起“自然空调”的作用；绿色植物对于放松神经、调节心理有也一定的作用。

3) 净化城市空气。城市化的发展使得人为排放的二氧化碳增多，大气污染严重， 建设一体化的生态园林可以起到维持碳氧平衡，吸收有害气体，滞尘降尘，杀死土壤和空气中的有害菌类的作用。美国得梅因市公共绿地面积约 4000hm^2，人均绿地近 200m^2，春季鲜花盛开，夏季绿荫遍地，秋季果实挂满枝头，冬季银装素裹，这里的市民很少患支气管炎、呼吸道、胃肠等疾病，而来此居住的人一段时间后疾病也不治而愈。

(二) 降 低 噪 声

噪声是城市环境中的一大污染。现代城市中日益严重的噪声影响了居民的正常生活，许多与噪声相联系的疾病如神经官能症、心律不齐、高血压、冠心病等等日见增多。在城市中建设一体化的生态园林，形成枝叶茂密、错落有致的植物群落可以减弱噪声对居民的影响。

(三) 抗 灾 防 火

许多具有宽厚木质层的绿化植物枝叶中含有大量的水分，一旦火灾发生，可以阻止火势蔓延、隔离火花的飞散。日本关东大地震引起的火灾烧掉了大片的东京土地，而日本中心区的火势却因公园绿地阻止了蔓延。10hm^2 以上的公园绿地还可以作为临时的避震场所。

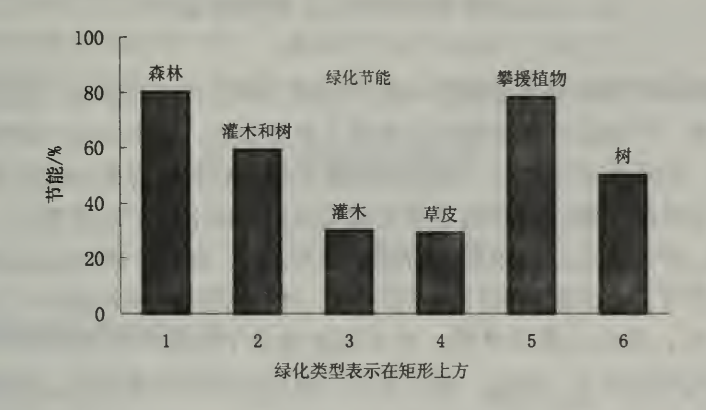
(四) 美化城市市容

一个城市只有建筑而没有绿化，就会缺少生机。如果用不同形态、不同色彩、不同

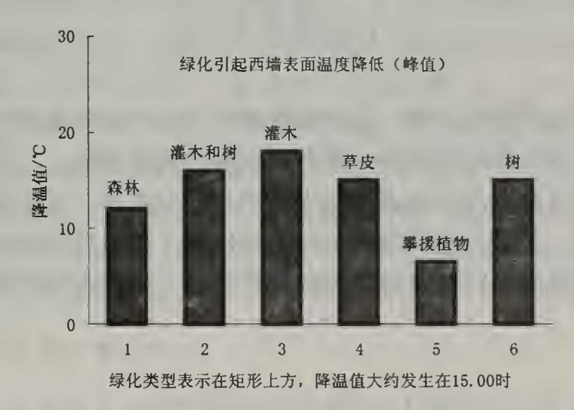
风格的植物丰富城市建筑群体的轮廓线，衬托建筑，增加艺术效果，就会达到变化空间、美化市容的效果。

(五) 节约城市建筑能耗

一体化的生态园林通过遮阳和蒸发作用调节建筑吸收的太阳辐射量，改变环境的温湿平衡，降低建筑负荷。在夏季树木遮挡太阳辐射，减少通过窗户的直接得热；有植物覆盖的外墙，由外到内传导的热量大大减少；大面积绿化地的渗透和潜热影响也非常明显。在冬季风屏作用减少了室外冷空气的渗透量，促进了建筑保暖。美国学者 Meier 总结了大量由于绿化而降低建筑维护结构外表面温度的实例(图 4-6)，最后得出结论：园林绿化使空调系统节省能量范围为 25%~80%。



1. 宾夕法尼亚；2. 迈哈密；3. 亚利桑那；4. 亚利桑那；5. 东京；6. 东京



1. 迈哈密；2. 东京；3. 东京；4. 亚利桑那；5. 亚利桑那；6. 巴格达

图 4-6　美国学者 Meier 建筑节能实例图

四、生态园林的生态分析

(一) 种 群 密 度

生态园林建设中，同样要根据种群的生物学特性选定合理的种植密度。以免因密度太大、同种间的恶性竞争，导致植株死亡。我国宝钢的绿化面积达到 300 多万平方米，平均绿地覆盖率达 38%。由于占地面积较广，群落中的种群往往通过水平的交错分布来减少物种间的竞争，保持群落的稳定性。有的地段把女贞、樟树、夹竹桃配置在一起，种植树密度太大，个体间强烈的竞争导致个体生长不良，种群出现退化的现象，达不到园林设计的目的。

(二) 种群的生态位和种间竞争

生态园林建设中要充分考虑群落中物种的相互作用和相互影响，选择生态位重叠少的物种构建群落，特别是在主要树种的选择上更要如此。在我国杭州植物园中，种植有树干直立高大、根深枝茂的槭树，能吸收群落上层强烈的直射光和较深层土壤中的矿物养分，林下灌木杜鹃只吸收较弱的散射光和较浅层土壤中的矿物质养分，二者在个体大小、根系深浅、养分需求和物候期方面都有较大差异，保证了群落的稳定性，同时在景观上春天杜鹃花开，夏天槭树和杜鹃错落有致、绿色成荫，秋天槭树叶片转红，充分地利用了季相特点，给人以美的享受。生态园林建设中还要考虑植物种间的相互作用方式，如不同种之间的寄生、共生、附生等等。构造合理的群落结构，形成稳定的群落环境。

(三) 物种的多样性

生态园林建设既包括野生生物，又包括栽培的当地种和外来种；既包括供观赏的园林植物，又包括具有抗性的绿化植物；既包括单株的观赏植物，又包括具有群体观赏价值的生物群落，因而园林本身就是真正的生物多样性的载体。面对自然生态破坏、物种匮乏的人类生存环境，只有提高群落的物种多样性，才能提高园林的抗干扰能力和稳定性，增加园林的环境效应，同时多样物种的园林满足了人们不同的审美要求，提高了园林的观赏价值。

(四) 生态系统的多样性

生态园林是城市的人工植物群落与周围环境形成的一个小的生态系统，要维持系统的稳定和平衡，保持城市的可持续发展，生态系统也应该是多样的。观赏型的生态园林应以美学原则为主，讲究意和形的统一；环保型的生态园林应以保护环境、促进生态平衡为主，讲究生态学原理的应用；保健型的生态园林应以植物的生态结构为指导，讲究

增强人体健康，以防病治病为主；科普型的生态园林应以激发人的学习兴趣、提高人的环保自觉性为主，达到传播知识的目的；生产型的生态园林应以经济价值为主，达到增加社会财富的目的；而文化环境型的生态园林应以形成一定的文化氛围为主，使人产生一定的景观意识。

（五）生态系统的平衡性

城市生态系统包括人群、动物、植物、微生物、自然环境、人工环境和废弃物等组成部分，它是一个不完整的、不能实现自我稳定的生态系统。生态园林作为城市生态系统的一个子系统能够进行初级生产，产生物质和能量，并在物质和能量的流动过程中产生生态效益，实现城市生态系统的自我调节。生态园林作为一个子系统，它本身是由植物、动物、微生物和其周围环境构成的，子系统内各营养级通过错综复杂的营养关系结合成一个有机整体维持系统的平衡。人类的社会活动是对生态循环的干预，不合理的干预会导致子系统循环的通道、方式和效率的改变，进而破坏生态系统的平衡。

五、生态园林的配置

（一）植物种类的选择

1．园林树木的树形及其观赏特性

树形是构景的基本因素之一。树冠由杆、茎、枝、根等组成，它对树形起决定性的作用。不同树种有其独特的树形，这种差异主要是由树种的生物学特性和外界环境因子的作用决定的。有的乔木树冠呈尖塔状或圆锥状，多有严肃端庄的效果；有的乔木树冠呈柱状，多有高耸静谧的效果；有的乔木呈圆钟状，多有雄伟浑厚的效果。树干的观赏价值与其姿态、色彩、高度密切相关，如白色干皮的白桦，红色干皮的红端木，青针白干的白皮松，蜿蜒扭曲的紫藤，通直轩昂的杨树都有较高的观赏价值。树枝是树冠的“骨骼”，其生长状况、枝条的粗细、数量、分枝角度的大小都直接影响树冠的形状和树姿的优美，如垂柳小枝下垂，倒影水中的胜景是我国传统植物配置方法之一。树根一般生长在土壤里，观赏价值不大，但有些根系特别发达的树种，根部往往高高隆起，突出地面，盘根错节，可供观赏。各具特色的树形在风景艺术构图中具有重要的意义。

2．园林树木的树叶及其观赏特性

树木的叶具有丰富多彩的形貌。就树叶的大小而言有的树叶奇大无比，有的树叶微不足“见”；就叶的结构而言有的呈单叶，有的呈复叶；就叶形而言有的树叶呈掌状，给人朴实之感，有的树叶呈羽状，给人轻快之感；就叶质而言有的树叶革质，具有光影闪烁的效果，有的树叶纸质，给人以恬静的效果，有的树叶粗糙而多毛，多富野趣；就叶色而言叶色大部分是绿色，但浓淡有所不同，常绿针叶树种多呈蓝绿色，阔叶落叶树种常呈黄绿色，到了深秋许多树种呈现不同深度的橙黄色、紫红色、棕黄色。在进行园

林设计时要考虑不同树种叶部的观赏特性，才能创造出优美的景色。

3．园林树木的花及其观赏特性

树木的花具有不同的花序、花形、花色、花香。花序密生的花，花感强烈；花序稀少的花，疏落有致，丽而不艳，秀而不媚。不同树种花形也形态各异：玫瑰花大色艳，颜色各异；牡丹富丽堂皇，争奇斗;，探春暗香浮动，娇艳欲滴；鲜红的石榴花如火如荼，给人以热情兴奋之感；雪白的丁香悠闲淡雅，给人以恬静自然之感，这是树木花色带来的不同效果。

4．园林树木的果实和种子及其观赏特性

园林中为了观赏目的而选择观果树种一般需注意形与色两方面。树木的果实千奇百态，有的形似铜元，有的晶莹透体，不一而足，有的果实不仅可以观赏，而且可以食用，香甜诱人，至于果实的色彩更是鲜艳夺目，给园林增加了不少生动活泼的气氛。

（二）植物种类的配置

园林植物的配置就是研究在基本满足生态习性要求的基础上，按照各自的观赏特性与功能作用，合理搭配，组成乔、灌、地被相结合的、多层次的人工生物群体，创造不同景观，丰富园林景色，为居民提供富有天然情趣的生活空间。

1．因地制宜，适地适树

因地制宜的“地”表现在不同的气候、土壤、地形条件及建筑物的性质、功能等方面。植物配置时要使所选取树种的生态要求与当地的立地条件相统一，建立相对稳定的植物群落，充分发挥园林植物改善和保护环境的功能，首先要根据当地的立地条件来选择树种，如深圳濒临大海，常有台风吹过，因而在进行园林规划时，抗风性这一因子是树种选择的主要因素之一。再如寒冷地区的冬季落光了树叶的树木使得园林的结构显露出来，因而，园林结构对园林的冬季形态有着特殊的影响，设计者利用了植物的不同形态创造出特色强烈的寒地园林空间。针叶树作为常绿树木构成了园林的骨干树种，大片的樟子松、红松林与白桦林相间布置并以白桦林作背景结合种植红色枝条的红端木，这样就会形成强烈的空间效果。其次要结合自然地形特点，来合理安排植物群落，组织植物景观，划分植物空间。地形和植物巧妙结合，能创造出许多意境深远的自然景观来。如南京市情侣园地形平坦，起伏变化不大，为强调地形的变化，在略为突起的地面上种植了雪松，增加了地形的起伏变化，极富山林情趣。最后要结合建筑物的特征来选择树种，如西双版纳景洪市的园林设计在这一点上体现的十分突出。景洪市的中心广场一侧的民族文化宫，具有傣族建筑的风格，因而在广场的植物配置上选取傣族的常用树种高榕(*Ficus altissima*)、垂叶榕(*F. benjamina*)、菩提树(*F. erligiosa*)来体现民族特色和民族风貌。

2．因材制宜，合理布置

因材制宜的“材”表现在植物的生态习性和观赏特性上，全面考虑植物在造景上的综合作用，结合立地条件和功能要求，合理布置。首先各种植物有不同的生态习性，配置时要先按照不同生态习性的树种相互配置时健康生长的要求，选择可以协调共存的树种，这是树木艺术配置的重要前提。其次要将设计的要求和树种的观赏特性结合起来，例如西双版纳景洪市的园林植物的配置就是以热带常绿树种和具有民族特色的花木为主，以外来的树种为辅，既充分体现了园林的地方风味和特色，又创造出了热带地区生机勃勃的景色。

3．因时制宜，季季有景

植物和其他园林组景不同，它的色彩和形态随时间的变化而不断的变化，春花、夏荫、秋实、冬青，给园林增添了无限的动态美景。因此在实际的树种选择和配置上应将花木成片栽植，加强艺术效果，突出各景区的风景特征，形成景景不同、季季不同的园林景色。随着树龄的增长，不同的园林树木本身树形、树皮、生长速度、对外界环境条件的要求都会发生一定的变化，如松树在幼龄时团簇似球，壮年时亭亭如华盖，老松则枝干蟠扎而有飞舞之姿，在配置时要创造出足以表现其美妙的条件。园林树木随树龄的增长种间关系也产生了相应的变化，所以在树种生长的过程中要适当的分批进行疏伐，保证目的树种的正常生长。如在乔灌混交的园林中，当树木接近郁闭时，由于灌木树冠和根系体系庞大，可能对乔木的生长产生一定的抑制作用，这时要对灌木进行一定数量的“平花”，从而调整乔灌木之间的关系。

4．因景制宜，突出功能

在园林设计之前要先确定园林的性质、功能，从整体出发抓住园林的整体风格再考虑局部的造景点缀。如娱乐场所宜多植树姿优美、色彩绚丽的树木花草，形成活泼明快的气氛；古典园林则要以古木参青的松柏为主，形成庄严肃穆的气氛。在空旷地上布置树木，其垂直方向要参差不齐，水平方向要前后错落，使有高低、虚实、明暗、前后之衬托。园林中的建筑如亭、台、楼、榭都必须用植物加以点缀衬托，所选的树种既要有一定的姿态、色彩、芳香等性能，也要有一定庇荫的实用效果，如把建筑物置于大片的丛林之中或按建筑物的体型、结构，用少数乔灌木加以衬托。水边植树必须和水景取得和谐，池岸边树的配置距离宜疏，灌木丛也不宜过密，以免妨碍眺望。树种以枝叶扶疏、枝干不向上发展而又柔和为佳。

第五章　草地生态学

第一节　草地生态学概论

草地是一项巨大的自然资源，我国草地面积广阔，具有重要的价值。草地不仅关系人类经济发展和人民生活水平的提高，也关系到人类生存环境的保护。草地生态学(grassland ecology)是生态学的分支学科，属于应用生态学的范畴，它以生物学、地学和普通生态学为基础，与农业生态学和景观生态学相互联系和渗透，为草地科学和环境学提供有关的基础知识。

一、草地概述

(一) 草地概念

草地(grassland)是人类重要的自然资源。世界草原、草甸(meadow)、森林区的次生草地和可利用的稀疏矮灌丛草地共计约 5×10^7km^2，占世界陆地面积的 33.5%(Horton 1979)。我国草地面积约 4.0×10^6km^2，占国土总面积的 41%(李博　1992)，为我国耕地、森林面积的三倍多，是我国面积最大的陆地生态系统。可见，无论是在世界范围，还是在我国，草地在人类生存空间都占有相当重要的地位，它不仅是草原畜牧业的生产基地，也在防止水土流失、土壤沙化及防风固沙等方面起着极其重要的作用。基于草地重要的经济、环境、社会价值，很久以来，它就是中外生态学家所关注的热点。

尽管国内外对草地曾有过不同的理解和解释，但比较多的和比较符合实际的认识还是较一致的，即：草地是草类和其着生的土地构成的综合自然体(周寿荣　1996)。因为世界上主要的和大多数草地都以禾本科草为主，且禾草在地球上分布极为广泛，饲用价值高，有的学者(Horton　1979，Snaydon　1987)就特别强调和重视禾本科草。另外，草地的概念中虽强调了草类，并非说草地上没有其他生活型植物，有时也有少量灌木或乔木散生其中，但仍是以草类为主。

(二) 不同地域的草地名称

草地在世界分布范围很广，在不同地区，草地有不同的名称。如在欧亚大陆叫斯太普(steppe)草地；在北美叫普列里(prairie)草地；在南美叫潘帕斯(pampas)草地；在非洲叫弗尔德(velds)草地、萨王纳(savana)稀树草原等等。不同的地域名称也代表了不同的植被类型，如斯太普草原优势植物是禾本科草本，而针茅属(*Stipa*)植物又是禾本科的典型

植物；普列里草地群落主要优势植物是针茅、冰草(*Agrioyron*)、格兰马草(*Boutelona*)等三属植物，其中格兰马草是北美普列里群落的特有植物；南美的潘帕斯群落主成分是臭草、三芒草、针茅、须芒、黍、雀稗等属的多年生禾草植物，此外，菊科植物特别丰富，可视为潘帕斯群落的典型特征；非洲的弗尔德草地，主要优势植物是菅属，植被稀疏，类似于半荒漠植被；而萨王纳草原的典型特征则是有旱生结构的小灌木和少数乔木及大型灌木。

任何客观存在的自然物，有其固有的自然属性，也有其经济属性。从不同的角度出发，就可能给予不同的名称和概念。上面讲的草地也主要从自然属性而讲。从经济属性看，草地用于割草叫割草地，用于放牧牲畜叫放牧草地，用于绿化环境叫草坪。

二、草地生态学概述

(一) 草地生态学概念及研究意义

草地生态学是运用生态学和系统论的观点和方法，研究草地生态系统的结构、功能、生物生产、动态、生态调控，并探索其实现高效、平衡和持续发展的科学(周寿荣 1996)。

在本概念中主要包括以下几点重要信息：

1) 草地生态学的研究方法主要是运用生态学和系统论的观点。生态学是指某特定的有机体与其环境的关系，在这里，即是以草地为中心，研究其与环境之间的关系。在进行二者之间的研究时，不可孤立地单独研究，而应将二者作为一个完整的系统，这样则区别于孤立研究的植物学及系统论。

2) 提供了草地生态学的研究对象，即草地生物群落和环境结合并具物质生产、能量流动、水分运转和营养物质循环四大功能的草地生态系统(Ovington 1962)。

3) 明确了草地生态学的研究目的，即是探索如何使草地生态系统实现高效、平衡和持续发展，以便维持草地生态系统的稳定，更好地发挥其作为畜牧业生产基地的作用，更好地为人类服务。

草地生态学是生态学的分支学科，属应用生态学的范畴(周寿荣 1996)。它以生物学、地学和普通生态学为基础，与农业生态学和景观生态学相联系和渗透，以综合分析和解决草地农牧业生产、自然资源的管理和环境保护中的生态学问题。

(二) 草地生态学的主要研究内容

草地生态学的核心目标是阐明草地生态系统的结构、功能及各亚系统(生产者、消费者、分解者与无机环境)之间的生态关系和调控途径，为充分发挥草地资源的生产潜力和建立优化生产体系提供依据(李博 1990)。其主要研究内容有下列几方面：

1) 草地生态系统的生物成分，即各生物种的分类、分布、生态生物学及生理学选择性及其现实的与潜在的生产性能与经济性能的研究。目前在草地的生物组成中，只有

少数物种被用于栽培和饲养，现有主要栽培牧草的遗传基础十分狭窄，家畜的种类更为有限，对许多生物种的潜在价值还了解甚少，对一些已利用物种的生态学和地理学限制也很少研究，许多牧草种子生产的机制也不了解。开展生物种与个体生态学研究，对发挥它们的潜在生产性能，提高草地生态系统的能流水平和生产力将起重要作用。

2) 草地植被-草地生态系统生产者亚系统的研究。草地植被是草地生态系统中最基本的组分，是系统功能状态与环境质量的直观标志，其他亚系统均受它的控制和影响。因此，草地植被是草地生态学最重要的研究对象，早期的草地科学多从研究草地植被入手。研究内容包括植被的类型、分布、组成、结构、生产力、资源性状、自然条件下和人为影响下的动态变化，以及其利用、改良与管理的途径。

3) 草地动物-草地生态系统消费者亚系统的研究。包括家畜及其他大型草食动物、小型草食动物、肉食动物和无脊椎动物等类群的数量、食性及食量、生物量、行为及生态习性、种群消长规律及其控制途径等等。在一般情况下，多以家畜为主要研究对象。

4) 草地土壤微生物-草地生态系统分解者亚系统的研究。包括微生物的类群、数量、生物量及其在能量和物质转化与物质循环中的作用，并常与草地施肥等农业措施相联系。

5) 草地环境，尤其是水、热状况，能量状况，土壤营养状况和管理水平对草地生物组成和草地生产力的影响，特别是它们之间的定量关系。

6) 草地生态系统能量生态学研究。包括草地能量环境、能量代谢、能量流动、各营养级之间的生态效率及其调控途径，以及维持特定能流水平的有效措施。

7) 草地生态系统物质循环的研究。包括草地环境中的养分库及其动态，植物对不同元素的利用及养分平衡，各种元素沿食物链的流动，生物组分的分解过程及速率，系统养分平衡及其调控途径等。

8) 草地管理及其模拟模型的研究。这项工作是草地生态学研究的重要目标之一，即在综合上述各组分(或亚系统)功能过程及驱动变量研究的基础上，提出草地生态系统科学管理的模拟模型，并根据模拟结果做出管理决策。

9) 草地生态工程及优化生产体系的建立。不同草地类型有着不同的生产潜力与开发前景，但不管任何草地类型，均可建立起相对高生产效率的稳定的优化生产体系。这种优化生产体系是草地生态学最终目标之一，它是在生态学原理指导下，通过生态工程设计与实施而建立起来的人工或半人工草地生产系统。这类工作近年来刚刚起步，但无疑具有广阔的发展前景。

(三) 草地生态学研究进展

在 20 世纪 60 年代以前，有关草地的研究和论著，多集中在草地的利用与管理方面，对草地植物和植物群落与环境的关系涉及较少。

20 世纪 60 年代以后，生态学的迅速发展，生态系统理论在生物科学各领域的渗透及系统论观点的大量运用，致使草地生态学的研究应运而生。1971 年，英国草地学家

Spedding 的《草地生态学》问世，是一部草地生态学专著，提出草地生态学是一门独立学科。随后，草地生态学的研究逐渐兴起。在 70~90 年代，各国进行了不同层次的研究，分别有：草地植物生物学和生理生态、草地植物种群生态学、草地植物群落结构与动态、第一性生产力、放牧生态、第二性生产、草地生态系统能量流动、物质循环、草地资源动态监测、草地管理模型的建立与应用等的研究(周寿荣　1996)。

我国是从 20 世纪 70 年代后期才开展了草地植物种群生态和草地生态系统的研究。80 年代发展较快，中国农业大学贾慎修组织翻译 Spedding 的《草地生态学》的出版，进一步推动了我国草地生态学的发展。其后，这一领域的研究从无到有，从弱到强，在许多方面取得显著成就，不少方面已达到国际先进水平。如草地植物区系及牧草种质资源研究(蒋尤泉　1989)，草地植物生物学及生理生态研究(李博　1991)，草地植被与草地资源研究(吴征镒等　1980，李博　1990)，草地动物研究(周庆强　1985，董继惠等　1989)，草地土壤微生物研究(廖仰南　1985)，草地生态系统能流研究，草原生态系统物质循环研究，草地资源动态监测等。

同时，有关的草地生态专著、论文及其他文献资料增多。如《草地生态研究方法》(姜恕等　1988)，《草地生态学的发展》(李博等　1991)，《草地第二性生产动力学模型》(吕胜利等　1991)，《草业科学研究方法》(任继周　1998)等。

未来草地生态学应在草地资源动态监测研究、畜牧业优化生产模式、草地动物研究、草地生态系统能流和物流，以及草地生物多样性及保护措施等方面加大研究力度。在研究方法上多利用遥感信息、地理信息系统、生态位、生态场、信息生态等方法和观点。

目前，我国草原退化、沙化、盐碱化面积逐渐扩大，如何治理退化草地，同时大幅度提高草地生产力，促进草地畜牧业的发展，是草地生态学面临的重大任务。另外，我国在该领域虽取得了一些成就，但与世界水平相比，仍显落后，如何加快草地生态学发展，创建具有我国特色的草地生态学体系，尽快赶上世界先进水平，是我国草地生态学所面临的又一艰巨任务(李博　1992)。

第二节　草 地 资 源

世界草地总面积约 5×10^7km^2，占陆地总面积的 33.5%，包括草原、稀树草原、草甸及森林区的次生草地；此外，全球约有 15%~20%的耕地用来种草。面积广阔的草地资源具有丰富多样的类型，不同类型的草地具有不同的功用，也丰富着人类和自然界。

一、草 地 分 类

草地是一个综合自然体，由于所处的具体地段不同，各种草地的自然经济特点极不相同。基于草地本身自然经济特点的差异，把生境条件相同、植物群落一致及其利用方式一样的草地可归并成同一类型。研究草地类型的目的在于揭示草地的各项自然特性和经济特点，并依此制定出正确的草地利用方式和经营措施(彭祥林等　1997)。

《中国植被》的分类采用的是植物群落学原则，或植物群落学-生态学原则，即主

要以植物群落本身特征作为分类的依据。但又十分注意群落的生态关系，力求利用所有能够利用的全部特征。

就草地与人类的关系即人类对它们的干扰程度而言，草地基本上可分为三大类：天然草地(natural grassland)、人工草地(artificial grassland)、半人工草地(图 5-1)。

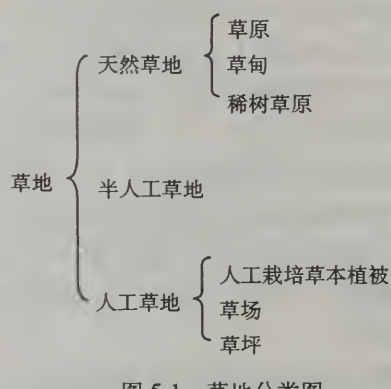


图 5-1　草地分类图

天然草地，顾名思义，即天然的植物群落，是自然形成的，基本上不加任何投入。亦即它们并非是人工种植的，受人为干扰因素较小。世界上大面积的草地都是天然草地。这种类型的草地大多组成成分复杂，结构多样，内部系统稳定性强，具有很好的抗干扰能力。另有许多天然草地，例如英国的永久性放牧地，并不是顶极植被(Davies　1960)，而是通过野生动物或农业动物的放牧以阻止它们向疏林或森林方向演替。Tansley(1939)将它们归为“亚顶极或生物偏途演替顶极植被”。

半人工草地即对天然草地进行一些改良，如采用补播或施肥等措施，以提高草地产量，使天然草地能为人类一定的利用目的而服务。

人工草地是完全由人工种植的植物群落。它们在植物组成上通常比较简单，选择种植的植物是以它们的生产力、营养价值及对当地环境的适应能力为依据的。世界上畜牧业发达的国家，人工草地面积较大，有的主要是人工草地，如英国、新西兰、德国、法国、荷兰等。人工植被毫无例外地都是人类社会长期经济活动的历史产物，深受社会制度和经济技术水平的强烈影响，这是人工植被与天然植被的最本质的区别(王伯荪 1987)。虽然人工草地与天然草地存在着本质的差异，但不可否认人工草地仍然是天然草地的模拟，它并不可能任凭人类主观愿望、违反自然规律而随意创造出来。所以，人工草地与天然草地之间又存在着不可分割的联系。

天然草地具有丰富多样的类型，不同类型具有不同的特性和功用，同时天然草地中植物和动物的种类及其相互关系是多样的和复杂的。根据系统论的观点，这样有利于天然草地生态系统的平衡和稳定。而人工草地虽是天然草地的模拟，但它毕竟是为人类特殊的目的而建立，如割草、放牧、绿化等等，所以在种类组成上成分比较单一，也没有像天然草地那样丰富的草地动物及良好的生境，以致人工草地在稳定性和生态平衡方面较差，这就需要人们运用农学、草地学、生态学、生态系统等多方面的理论知识来科学地管理人工草地，以便达到人们预期利用的目的。

二、天 然 草 地

决定草地性质的有多方面的因素，因此，草地分类的原则必须是综合的，也就是要考虑草地所处的地形、基质、土壤、水分、植被等。草地植被可以作为草地分类的主要标志，因为一个地区的植被类型本身就是该地区所有环境因子的综合体现。

草本植被的分类大多以其生态学特征为依据，通常是根据草本植物群落的优势生活型，而划分为草甸、草原及稀树草原等类群(王伯荪　1987)。

(一) 草 原 草 地

1. 草原

由喜温、旱生、多年生草本植物为主(有时以旱生小半灌木为主)组成的植物群落叫草原。它主要是由所在地区的气候因素和历史条件所决定的，是一种地带性植被(李博　1979)。在组成关系上，多年生禾本科草或禾草类型的丛生草，以及一部分地衣和地面藻类植物组成的层片有显著的地位，能忍受长期的干旱。而在许多情况下，又具有忍受相当程度的暂时湿润的能力(Ярошенко　1959)。这种半干旱半湿润气候条件不足以支持森林的发育，从而阻止其向森林或疏林发育，但却足以维持耐旱的多年生草本植物，尤其是禾草类的繁茂生长。

据 Lieth(1972 年)统计，全球温带草原面积约 900 多万平方公里，除一小部分垦为农田外，大部分地段作为天然放牧场。由于地球上水陆分布关系，草原多分布在北半球，面积最大的是欧亚大陆草原，其次为北美大陆草原。在南半球，草原的面积不大，只见于南美的阿根廷和非洲东南部山地(图 5-2)。草原地区的气候夏季温和，冬季寒冷，春季和晚夏有一明显的干旱期，由于低温少雨，草群较低，地上部分一般不超过 1m。典型的草原土壤为栗钙土。

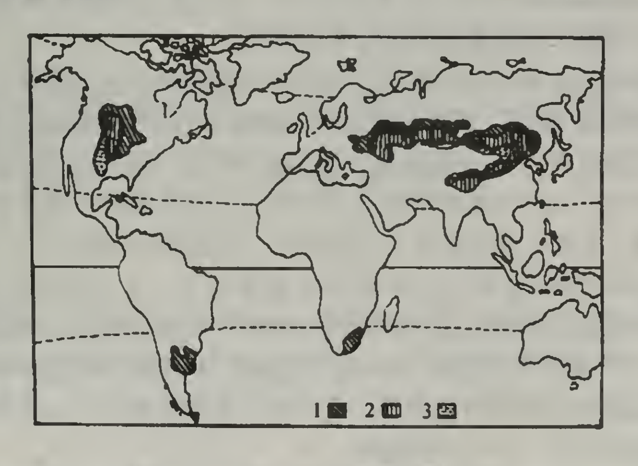


图 5-2　世界温带草原分布略图(李博　1999)

1. 高草草原或草甸草原；2. 典型草原；3. 矮草草原或荒漠草原

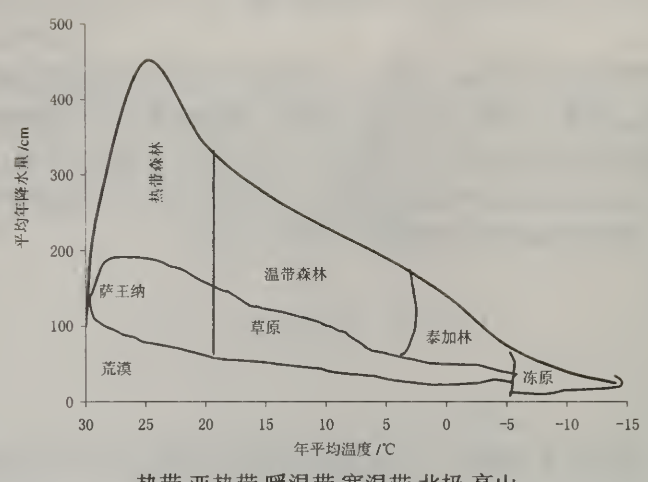


图 5-3　草原与气候因素以及其他生态系统类型的关系

草原在地球上的分布是有一定的地带性规律的。一般来说，它处于湿润的森林区与干旱的荒漠区之间。靠近森林一侧，气候半湿润，草群繁茂，种类丰富，有时还出现岛状森林，如欧亚大陆的草甸草原和北美的高草草原；而靠近荒漠一侧，雨量减少，草群低矮稀疏，种类组成简单，并常混生一些旱生小半灌木或肉质植物，如北美的矮草草原与欧亚大陆的荒漠草原。上述二者之间为辽阔的典型草原(李博文集编辑委员会 1999)(图 5-3)。

2. 草原的分类

(1) 采用生态外貌原则可划分为草甸草原、典型草原(真草原)及荒漠草原

以 E. M. Лавренко(1940)的《苏联的草原》为代表，草甸草原可称为中生旱生草原，真草原为旱生草原，而荒漠草原为过旱生草原。

草甸草原建群种为中旱生丛生禾草，伴生有大量的旱中生杂类草。主要分布在较湿润的地区，即森林草原地带。草甸草原是草原群落中生产力较高的一类，草群比较高大、茂密，草群总盖度可达 60%或更高，地上部分干草产量每公顷可达 2000kg 左右，种类组成也比较丰富，1m^2 平均种数约为 20 种。这类草原适于饲养大牲畜，尤宜于养牛。开垦后可种草、种粮，旱作条件下可以稳产，改造条件比较好。

典型草原建群种和优势种均以典型旱生植物为主，尤以旱生丛生禾草占绝对优势。与草甸草原比较，典型草原的茂密程度和生产力都比较低，草群总盖度 40%上下，地上部分干草产量平均每公顷 1000kg 或更低；种类组成也比较单纯，1m^2 内有 15 种左右。这类草原是最好的天然放牧场，适于牧养各类家畜。但因水分条件较差，旱作多不能稳产，改造起来要比前一类型困难。

荒漠草原建群种由强旱生丛生禾草组成，伴生一定数量的小半灌木。这是荒漠草原地带的代表类型。荒漠草原是草原群落中旱生程度最高的一个类型。草群低矮、稀疏，总盖度 15%~20%；生产力很低，地上部分干草产量平均每公顷 200~300kg 或更

少；种类组成贫乏，1m^2 内有 11 种左右。但草群中蛋白质与脂肪含量较高，饲用价值较高。这里是小畜的优良放牧场，最适于养羊。因气候干旱，不能旱作，改造条件差(李博 1979)。

(2) 依据气候所决定的群落季节节律特征或各种气象因素的剧烈季节性变化而分类

以 Ярошенко(1966)为代表，将草原分为：I. 温和夏旱气候草原；II. 温和冬旱气候草原(真普列得群落)；III. 温和高位山地气候草原；IV. 干燥亚热带草原。

(3) 我国草原系统类型及分布

我国草原主要分布在西北半壁，从北纬 28°到 51°，南北跨越 23 个纬度；从东经 74° 到 127°，东西绵延 53 个经度，总面积约 $4\times10^6km^2$。在如此辽阔的区域内，地带分异明显，根据自然条件与生物学区系的差异，大致可分出 4 个生态系统类型(或栖息地类型)，即：① 温带草原；② 高寒草原；③ 荒漠草原；④ 荒漠区山地草原。4 类草原的特点如表 5-1 所示。

表 5-1 我国不同草原类型的比较

	项 目	温带草原	高寒草原与高寒草甸	荒 漠	荒漠区山地草原
气候	大气环流	太平洋东南季风，蒙古高压	印度洋西南季风，西风环流	终年为西风环流控制	终年为西风环流控制
	≥10℃积温	1600~3000	200~2000	2500~4500	800~2700
	降水 1mm	150~450	10~200	10~200	200~600
植物区系	优势地理成分	亚洲中部成分 蒙古草原成分	中国-喜马拉雅成分，北极成分，高山成分	中亚成分	地中海成分
	优势植物类群	丛生禾草 根茎禾草		灌木，半灌木	丛生禾草 半灌木
	维管植物种数	4100	4385	3900	
优势动物	野生动物	黄羊、狐、啮齿类	藏羚、雪豹、啮齿类	鹅喉羚、野驴、啮齿类、爬行类	狍、岩羊
	家畜	马、黄牛、羊	牦牛	骆驼	细毛羊

(二) 草 甸 草 地

1. 草甸

草甸植物群落由多年生中生或旱中生植物所构成，并且常常和地下水相联系(李博 1960)。通常是中生性的地面芽植物占优势，许多植物在雪被覆盖下，至少在整个冬季部分地保持绿色。草甸植被处于森林气候的温带或亚极地，无明显的干季。草甸一般不呈地带性分布，是特殊生境的产物，是一种隐域性植被。它广泛分布于欧、亚、美各洲的森林地带。草甸大多是森林破坏后形成的次生植被，而在高纬度或高海拔的草甸可有其原生类型。

2. **草甸植被分类**

(1) 依生境或生态原则来划分

A. Л. Шеников(1938)的草甸植被分类，可作为草甸生态分类的代表。他认为草甸是一个植被型，进而划分为 5 类，即：I. 真草甸，或真中生草甸；II. 草原化草甸，或真旱中生草甸；III. 荒原化草甸，或高山寒土中生草甸；IV. 水生草甸，或沼泽化草甸；V. 酸中生草甸或泥炭化草甸。他还举出一个值得注意的生态系列图解(图 5-4)，表明这些类型之间的生态相互关系，以及它们在相邻的非草甸类型中间的地位。《中国植被》把草甸看做是独立的一个植被型，采用生态学原则分类。

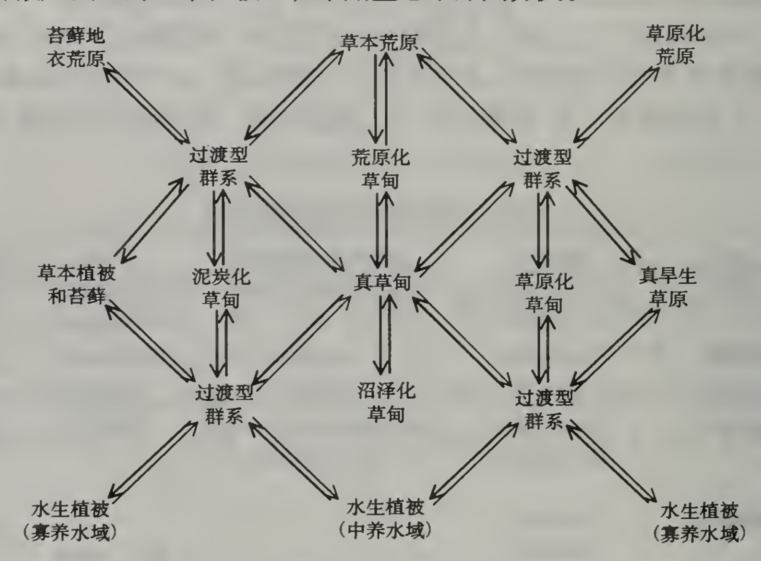


图 5-4　草甸植被和相邻型的生态系列图解(引自 Шеников　1941)

(2) 依生境分类即地形学分类

以 Л. Г. Раменскеи(1929)的草甸植被分类为代表，将草甸分为：I. 大陆草甸：① 平原的、缓坡的和低洼的草甸；② 坡地草甸；③ 山地草甸；④ 高山草甸；II. 河漫滩草甸：① 短期水泛草甸；② 中期和长期水泛草甸；③ 特别长期水泛草甸。

(三) 稀树草原草地

1. **稀树草原**

稀树草原，是热带或亚热带草地，生长在具有周期性干湿季节交替的热带地区，群落以草本植物为主，乔灌木通常有规则地出现在草被之中，这些散生乔木都是旱生结构，如半矮生、多分枝、树干不整齐、树冠呈伞状、叶多为羽状具毛茸等。热带稀树草原有多种多样的类型，从没有树木的干旱草原直到几乎郁闭的森林都可见到。从演替角度来看，稀树草原是一种气候顶极群系，或是一种主要受放牧和周期性火焚所制约的生物顶极群落，或者是一种由特殊土壤条件形成的土壤顶极群落。

2. 稀树草原分类

稀树草原是较特殊的植被类型，关于它的分类一向有较多争议。Ellenberg 和 Mueller-Dombois(1967)把稀树草原与草原、草甸并列，同属于陆生草本群落这一最高分类单位。《中国植被》把它作为一个独立植被型与草原植被型平行组成草原和稀树草原植被型组，而与草甸植被型组并列。

三、人 工 草 地

(一) 人工栽培草本植被分类及草地生态农业

栽培植被与自然植被一样，都是在一定的生态条件下形成的，都有一定的外貌结构，植被相互间及与环境之间也都具有相似的规律。但也应考虑到栽培植被与人类关系紧密的具体特点。因此，自然植被分类所采用的原则和系统，不同程度上也适合于栽培植被，但需根据生产实践情况，尤其是栽培目的和经济用途等特点来进行分析、概括。

《中国植被》主要依据建群植物的高级生活型、栽培植被的群落结构与生态地段的特征，以及栽培植被的经济意义等原则，将我国的栽培草本植物分为以下几种类型：

1. 大田作物型

(1). 旱地作物型

1) 一年一熟作物组合型；
2) 二年三熟作物组合型；
3) 三年五熟作物组合型；
4) 一年二熟作物组合型；
5) 二年五熟与一年三熟作物组合型。

(2). 水田作物型

1) 一年一熟作物组合型；
2) 一年二熟作物组合型；
3) 一年三熟作物组合型。

2. 蔬菜作物型

1) 一年一作为主的蔬菜组合型；
2) 一年二作为主的蔬菜组合型；
3) 一年三作为主的蔬菜组合型；
4) 一年多作为主的蔬菜组合型。

以上两种作物型都是草地农业生产中的重要类型。

自从出现人类以来，农业就伴随而出现。大面积的荒地开垦为农田，种植出庄稼，养育了人类。可以说，农业的出现，是人类历史上的一次重大飞跃，它是人类又一次征服自然界的伟大胜利。随着生产力的发展和人类的进步，有限的农田已不能完全

满足人类的需要，于是，在有限的农田中，种植出高产高效的粮食作物，便是当今需要重点考虑和解决的问题。

人工草地在一定程度上缓解了这种压力。从国际粮食总量的分流情况看，用于饲料粮的比例为43%左右，畜牧业发达国家，如美国则高达75%左右。另外，人工种草增加了大批高蛋白饲草和饲料粮，替代了大量食用粮。饲料作物可缓解畜牧业快速发展与用料缺乏之间的矛盾。

20世纪70年代，任继周教授针对我国传统农业以单一种植业为主的格局，提出了草地农业生态系统理论，把牧草与家畜充分引入单一种植业系统，以土地—植物—动物“三位一体”的综合观点研究农业生态系统的建设、管理与效益(任继周 1995)。该草地农业包括前初级生产、初级生产、次级生产、后次级生产四个层次，草地农业系统中的经济效益存在着金字塔模式。草地农业生态系统是草地生态系统在人为的干预下，不断地向农业化方向发展的产物。在此过程中它逐步具备了自然生态系统难以具备的各种功能，而且这些功能将随着社会生产水平及科技水平的不断提高而日趋完备和强大，尤其系统耦合将从多方面提高草地农业系统的整体生产水平。

草地生态农业主张将整个农村产业所涉及的土地、能源、植物、家畜、劳力、技术及物质资源看做一个相互依赖的整体系统，按照生物生长和物质循环的生态规律，合理安排农、林、牧、副、渔等产业比例，充分发挥各生物因子的作用，使其生物产量最高，光能利用率最大，绿色植被最多，农副产品利用最合理，系统动态平衡最佳，系统经济效益最高，资源利用最合理。这就要求打破以种植粮食作物和经济作物为纲的传统的二元农业模式，大力发展以粮食作物、经济作物、饲草饲料作物为模式的三元化农业结构。实践证明，这一新型农业模式，既解决了用地和养地的矛盾，又解决了发展畜牧业饲草不足的困难，取得了较好的经济效益。推广农业结构可采用两粮两草、粮棉草、粮油草间种套作和粮草轮作等模式。

(二) 草　场

依人工草地的不同功用，可将其分为草场(pasture)和草坪(lawn)。

1. 草场

人工草地，主要用来作为放牧地或割草地等的，即称之为草场。实际上，草场也包括天然放牧草地，也就是说，草场是已被人们开发利用的草地。

在草地畜牧业中，放牧和割草是草地利用的基本方式。

2. 草场的分类

草场可分为天然放牧地(即牧野)和人工放牧地。

天然放牧地为自然形成的禾草、其他草本植物和灌木等的生长地，各类植物生长的比例，随气候和放牧利用的程度而不同，包括各种类型的天然草地和其他天然放牧地(灌丛、荒漠、苔原、开阔林地、撂荒地等)。

人工放牧地包括人工种植和培育的以多年生牧草为主的永久放牧地；短期的轮作放牧草地，也包括人工种植用以放牧的一年生牧草地和临时性的填闲作物地。永久放牧草地以多年生禾本科牧草为主，常混播少量豆科牧草，容牧能力较高，为人工种植、施肥、灌溉，一定时期进行补播，有良好的管理并实行合理利用；短期放牧地为耕地中与大田作物轮作的短期草地，是一种栽培的高产优质草地，能较好保证牧业的需要和维持农田生态平衡，常用于放牧或割草兼用；临时放牧地为人工种植的一年生牧草或饲料作物地，生长期供家畜放牧利用；补充放牧地为在一年中可能只利用 1~3 个月的短期放牧地，以补充永久放牧地之不足，此类牧地仍为人工种植的一年生牧草或饲用作物，利用其刈制干草或刈青后的再生草用作补充牧地(周寿荣　1996)。

(三) 草 坪 草 地

1. 草坪

草坪是指由人工建植或人工养护管理的以禾本科草及其他质地纤细的植物为覆盖并以它的根和匍匐茎充满土壤表层的地被，起美化环境、园林景观、净化空气、保持水土、提供户外活动和体育运动场所的作用，是一个国家、一个城市文明程度的标志之一。

草坪是最具观赏性的人工草地。了解草坪的种类、养护、管理，才能更好地利用草坪，更好地为城市绿化做贡献。

2. 草坪的分类

一般来说，具有不同用途的草坪对其草种的选择有不同的要求。如：

1) 广场绿地(图 5-5)。广场绿地是一个城市园林绿化水平的集中体现，从一定角度讲，它是城市文明程度的象征，因此，其草坪质地要求高。一般要求叶片更加细腻，质地密集，美观效果俱佳的草种，以便起到对城市建筑群落“净化、简化、统一视觉的作用”。

2) 公园草坪(图 5-6)。草坪是公园的重要组成部分，公园草坪常与园林林木、园林小品等构成优美的景观环境，为人们提供休闲、观赏、运动等户外娱乐活动场所。草作为园林景观，除了具有调节湿度、光合作用、释放氧气等生态功能外，还要有不与树木、乔灌木大量争地的特点。因此，公园里的草要求具有耐荫性强、质地细致、绿期长、易养护等特点。

3) 公路护坡草坪(图 5-7)。草坪用于公路护坡，不仅可以防止公路边坡的水土流失，同时可以改善道路的景观，减缓驾驶员的疲劳。对于一些无法栽植树木的陂坡地带，则需要用强化绿化技术，这就常常用高压喷播技术来实现。用于公路护坡的草坪要具有抗旱性强、覆盖能力强、耐粗放管理等特点。常用的草种有虎尾草、细叶小米草、高羊茅、黑麦草、白三叶、假俭草、冰草等。

4) 体育运动场草坪(图 5-8)。足球场草坪，不仅可以为观众和竞赛者提供良好的感观享受，更有助于运动员在比赛中发挥球技，减少比赛受伤的机会。这就要求足球场草

坪应有极强的耐践踏能力、再生能力和耐荫等特点。

5) 高尔夫场草坪(图 5-9)。高尔夫球场草坪区有果岭、发球台、球道、高草区等。用于指球的果岭草坪仅有 3mm 高，质地稠密，富有弹性，犹如地毯。高尔夫球场的草是草坪中各类不同类型草的集中表现，这是因为在高尔夫球场，有不同用途的地方，如果岭、发球台等，也有不同的地势、地形，因而它对草的要求最严格、苛刻。高尔夫球场常用的草种仅有匍匐翦股颖。可用于开球的发球台和击球的球道的草坪种类有早熟禾、翦股颖、结缕草、狗牙根、假俭草等，高草区则是较普通的草坪。



图 5-5　广场绿地



图 5-6　公园草坪



图 5-7　公路护坡草坪

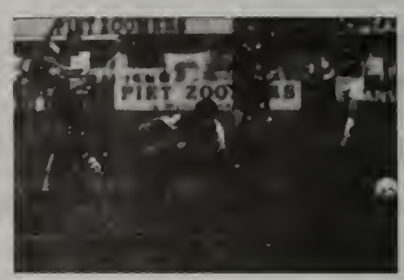


图 5-8　体育运动草坪



图 5-9　高尔夫球场草坪

6) 河岸护堤草坪。江河流域植被受到破坏和河堤抗洪不利是造成洪灾的原因之一，而以草为主体的草被植被层在水土保持和固堤护坝中起到了重要作用。实验证明，草在保持水土、抑制地表径流方面起的作用十分显著。草及根系可吸收大量降水并能大

大延缓强降雨过程中地表径流的快速形成。因此选择草种时，应据不同的生态条件选择根系发达、分蘖力强、抗性好、耐水渍性并易于管理的草种。

7) 特殊用途草坪。针对不同的特殊生境，建植草坪。如矿区的植被覆盖，山地强制绿化等，需据不同用途和条件选择特制草种，用特殊绿化措施，方能达到美化、绿化环境，改造自然条件的要求。

3. 草坪建植

草坪建植，需要以下步骤：

(1) 确定草坪类型，正确选择品种

总的来讲，草坪分为装饰性和娱乐性两大类。装饰性草坪一般很少允许人入内践踏，是作为艺术性绿地供人观赏，因此不需其耐磨性能。而娱乐性草坪除了美化环境外，必须要求具有较大强度耐磨损的能力，因为像运动场所的比赛、野营地休闲都离不开人们的强度践踏。所以应充分了解各品种之间的差异和各自的优缺点，根据不同的适应范围选择不同的品种。

(2) 整地

确定草坪类型后，就要考虑所植地域的土地状况，这取决于土壤的类型。很明显， 沙土和黏土不同，若黏土量大则需加入沙土以增强其排水能力，沙壤土则常需积肥以确保充足的土壤肥力。地面是否背荫或积水也会影响到草坪的后期生长。因此，整地就是用铲、耙、犁等清除土壤表层中的碎石、杂草、杂物，使植坪地成为质地疏松、透气、平整、排水良好、适于草坪草生长的苗床。

(3) 植坪

建植草坪常用的有草皮建植和种子建植两种方法。草皮建植是一种建植迅速的方法，但用草皮建植困难在于：草皮价高，所需草坪草的组成不能完全保证并且易受杂草侵染。异地移植，草坪病虫害感染机会也较多，草坪的平整、美观受到局限。而种子直播可以克服上述困难，它成本低且可根据草坪的具体要求选择最适合的、最好的品种或配比达到目的。

播种过程就是把种子用播种器或用手按不同品种的播种量均匀地撒播在坪床表面， 然后覆土耙平。为了播种成功，获得健壮的幼苗，播种时有必要带少量的种肥。一般来说，晚秋是最好的播种时期，但是如果水分充足，除了冬季之外，播种建坪可在一年中的任何时候。播种后还需使土壤保持湿润。

4. 草坪管理

播种后的后期管理非常重要，以下提供 8 个方面的管理要素，包括打孔透气、松根、修剪、杂草控制、施肥、灌溉、补播及病害防治等。

1) 打孔透气。在草坪上扎些小孔以便为根茎提供充足的氧气。每年进行 2~3 次便可提高草坪质量。

2) 松根。从草坪地中除去死叶和农药残留物，让草自由呼吸，以减少真菌和疾病的感染机会。松根可在春秋两季各施一次。

3) 修剪。每周修剪 2~3 次可以保持草坪质地密集、有弹性。装饰草坪应保持在 2~4cm 的高度，娱乐用草坪应在 4~5cm。

4) 除杂草。可采用化学或生物等不同方法解决。对于大多数草坪来讲，苔草是主要的杂草类型。造成长苔的原因通常是由于修剪的太低或营养不良或土壤的 pH 不理想；也可能是因为日照不充足。去苔可选用硫酸亚铁，若杂草太多，就必须翻地进行重新播种。

5) 施肥。每隔 4 周施一次肥，秋冬季无需施肥。在贫瘠的土壤中应加入一定数量的有机肥和缓效复合肥，以提高土壤肥力和保障草坪草的正常生长发育。

6) 灌溉。播种后应及时浇水，使用喷灌效果最好，而且应当每天浇水以保持土壤湿润。但浇水也不宜过多，否则会使草的根系变懒，不往土地深处长而降低草坪的抗旱性能。

7) 补播。就是播种那些非常易遭践踏而被磨损的地块。

8) 病害防治。是保证草坪是否具有美观外貌，实现其功能的重要措施。常见的草坪草病害有禾草褐色条枯病、褐斑病、尾孢属叶斑病、铜斑病、霜霉病、枯萎病、菌核病等。草坪病害的防治，要加强管理，防重于治，一旦有了病害，治就比较困难。

第三节　草地的功能

草地作为全球重要的陆地生态系统，起着十分重要的作用，这种作用可概括为两方面，即经济功能和生态功能。

一、草地的经济功能

(一) 提供食物来源

草地是地球上的生产者，人类的食物有相当一大部分靠其为生。事实上，人类生活水平的提高是建立在利用各种类型的植物的基础之上的。草地被驯化栽培，形成大面积的人工草地，目前，有 150 种植物被广泛栽培，并进入市场，30 种成为人们广泛种植的粮食，其中，小麦、水稻、玉米约占一半。

首先，草地是野生动物重要的食物来源。天然草地上具有丰富的动物资源，种类繁多的野生动物不仅是陆地生态系统中的重要组成部分，而且也是当地牧民狩猎业的对象和经济来源。其次，草地也是家畜重要的食用饲料，尤其是禾本科、豆科的一些种是优良的牧草。我国草地面积近 $4.0\times10^6km^2$，占国土面积的 41%左右，是我国农田面积的 3 倍多。据 1990 年统计，全国牧业产值 1964.07 亿元，占农业总产值的 25.63%，近年来又有新的发展。草地孕育了丰富的野生动物，为人类提供了大量的肉、禽、蛋、奶制产品，丰富了人们的饮食结构。再次，随着科学技术的发展和绿色食品工业的兴起，天然草地也是绿色食用植物的重要产地。如蕨菜、黄花菜、白蘑等早已被利用。

(二) 衣　　着

利用兽皮、绒毛、毛和裘皮作为衣着，这是草地对人类健康做出的巨大贡献，使人能抵御比无衣着时所能忍受的更为寒冷的气候。在人类需要的衣着中(包括毡毯和动物性纤维的其他家庭用途方面等)，原料来自家畜的或来自整个草地动物的比例是很高的。有的国家已将饲养家畜的主要目的变为剪毛(如澳大利亚的羊毛)、产奶等，而产肉则作为副产品来用。

(三) 其　　他

高大的草本植物是造纸的原料之一，如芦苇、大叶章、芒、五节芒等。荒漠草原草地上的老鸹头是优良的蜜源植物，沙棘、西伯利亚杏等是饮料食品的重要原料。草原地区还可提供多种药用植物(如黄芪、人参、党参等)、野生花卉植物、资源动物、珍稀动植物和许多珍贵的家畜品种。

草地重要的经济功能促进了草地产业的迅速兴起。早在 20 世纪 80 年代初，著名科学家钱学森就提出了“立草为业”的概念。现经过 20 年的发展，人们已经开发出了草地的许多新的经济功用。但这种开发又必须注意合理与适度，因为草地还具有另外一个重要的功能即生态功能。

二、草地的生态功能与社会功能

长期以来，我们都比较看重草地的经济功能，一提到草地，都注意到草地是重要的生产资料，是重要的可更新的资源，能生产肉、奶、皮、毛，能提供大量的畜产品，有大量的宝贵的特有的经济职能，而往往忽略其生态功能与社会功能。2000 年 10 余次袭击北京的沙尘暴，西部大开发，长江的洪灾等许多重大问题，使我们对此有所反思。认识到草地的生态功能其实更为重要、更为突出。草地的生态功能与社会功能，概括起来，主要有保持水土、形成土壤、净化空气、调节气候、防风固沙、维持碳氧平衡、美化环境及重要体育运动的基础等。

(一) 保 水 固 土

我们知道，假如地表裸露，没有植物覆盖，大雨过后水土流失是十分严重的。但是很少人知道，在我国南方桉树林下，由于桉树的物理作用及其分泌物的化学作用，尽管大树成林，但林下灌木与草本层缺乏，大雨过后，水土流失同样十分严重。即要保持水土，光有树还不行，还必须有草。

草的水土保持功能十分重要，在许多情况下，它比树的作用更突出。据西北水保所测定，种草的坡地在大雨状态下可减少地面径流 47%，减少冲刷量 77%，保持水土能力比农田大数十倍。生长 2 年的草地拦截地面径流和含沙能力分别为 54%和 70.3%，比 3~8 年林地拦截地面径流和含沙能力高出 58.5%和 88.5%。草之所以具有如此强大的水

土保持功能，主要由于：草的根系发达，而且主要都是直径≤1mm 的细根(图 5-10)，实验表明，这样的根系具有强大的固结土壤、防止侵蚀的能力。另外，草本植物大量的地表茎叶的覆盖，可以减少降雨对地表的冲刷。因此，草本植被在保水固土方面作用突出。

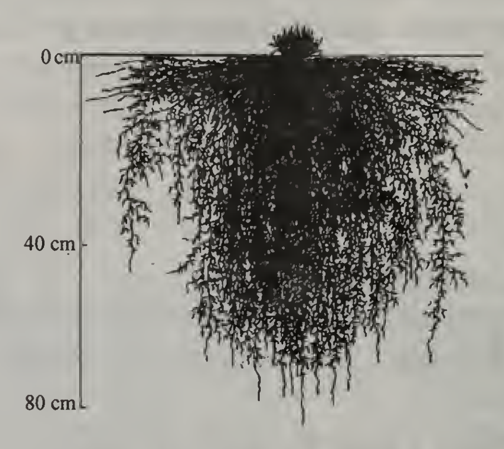


图 5-10 黑麦草属(*Lolium*)发达的根系

（二）土壤形成的主要因素

地球表面覆盖的一层薄薄的土地，对于大自然，对于我们人类本身都具有十分重要的作用。没有肥沃的土壤，就不会有茂盛的植物、丰富的大自然和我们人类的今天。在土壤的形成中，草地的作用尤为重要。栗钙土、黑钙土、草甸土、沼泽土等草原土壤的形成，是草地植被作用的结果。与木本植物相比，草地植被在形成、改良土壤中的作用十分重要，而且很具特色。

1) 草地植被在土壤表层下面具有稠密的根系并残遗大量的有机质。据研究，高寒草甸类草地的珠芽蓼和线叶蒿两种草地，在 0~50cm 土层中的根量每公顷分别为 5.22×10^4kg 和 4.74×10^4kg，其氮素含量分别为 657.72kg 和 815.28kg。这些物质在土壤微生物的作用下，可以改善土壤的理化性状，并能促进土壤团粒结构的形成。

2) 草地中的豆科牧草，根系上生长大量的根瘤菌，具有固定空气中游离氮素的能力，可为草地生态系统提供大量的氮肥。因此，具有改良土壤、培肥地力的作用。以豆科牧草为主的草地，平均每公顷每年可固定空气中氮素 150~200kg。如生长 3 年的紫花苜蓿草地可形成氮素 150kg，相当于 330kg 的尿素。

3) 根系中的矿质元素，在吸收、积累、分解过程中，对土壤碳酸钙淋溶与积淀，对钙积层形成，对黏土矿物形成都有一定的作用。

（三）净化城市空气

- 空气质量好坏在很大程度上影响着人们的健康。

净化城市空气主要是通过城市中各式各样的绿地来完成。

1) 城市绿地中的草本植物通过光合作用进行物质循环，可吸收空气中的二氧化碳并放出氧气。一般草地每小时每平方米可吸收二氧化碳 1.5g，如果每人每天呼出二氧化碳平均为 0.9kg，吸进氧气 0.75kg，每人平均有 $50m^2$ 的草地就可以把呼出的二氧化碳全部还原成氧气。

2) 草池能吸收、固定大气中的某些有害、有毒气体。据研究，草坪草能把氨、硫化氢合成为蛋白质；能把有毒的硝酸盐氧化成有用的盐类。

3) 某些草坪草能分泌一些杀菌素，从而减少空气中细菌含量。据测定，草坪上空的细菌含量，仅为公共场所的三万分之一。因此，草坪是空气的天然净化器。

4) 茂密的城市绿地可不断地接收、吸附空气中的尘埃。据北京市环境保护科研所于 1975~1976 年测定表明，在 3~4 级风下，裸地空气中的粉尘浓度约为有草地空气中粉尘浓度的 13 倍。草坪足球场近地面的粉尘含量仅为裸露黄土地的 1/3~1/6。

(四) 减少城市噪音

因为汽车、建筑业等的发展，使城市噪音污染问题愈显突出。噪音污染的控制有多种措施，包括草地在内的植被的作用也十分重要。据研究，草坪植物具有良好的吸音效果，能在一定程度上吸收和减弱 125~8000Hz 的噪音。乔、灌、草结合其效果更好，据北京市园林研究所测定，20m 宽的草坪，可减噪音 2dB 左右；杭州植物园一块面积 $250m^2$，四周为 2~3m 高的多层桂花树的草坪，经测定，与同面积的石板路相比，噪音减量为 10dB。在国外有一些飞机场，用草坪建设机场地面，既可减少飞机场的扬尘，又能减缓噪音。

(五) 调 节 气 候

草地调节气候的功能，主要有三方面作用：

1) 草地可截留降水，且比空旷地有较高的渗透率，对涵养土壤中的水分有积极作用。据试验，冰草的降水截留量可达 50%。

2) 由于草地的蒸腾作用具有调节气温和空气中湿度的能力，与裸地相比，草地上湿度一般较裸地高 20%左右。

3) 由于草地可吸收辐射外地表的热量，故夏季地表温度比裸地低 3~5℃，而冬季相反，草地比裸地高 6~6.5℃。

(六) 美化环境，净化心灵

草地，尤其是城市草坪，其美化环境，提高人们精神素养的功能尤其值得重视。一片翠绿的草坪，能给人一个静谧的感觉，能开阔人的心胸，陶冶人的志趣。绿色的草坪，映衬着五彩缤纷的鲜花，良好的景观可使生活在这种环境中的人们忘记疲劳和生活中的忧伤。在公园绿地郊游、家庭聚会、野餐也会给人以美的享受。

1984 年，美国《科学》杂志曾报导，在病房外种草坪及绿色的植物可以使做手术的病人恢复更快。因为绿色让人感觉愉快、干净、凉爽、心旷神怡，对病人恢复健康很有好处。

第四节　草地生态系统

一、草地生态系统的定义和组分

(一) 草地生态系统的定义及内涵

草地生态系统(grassland ecosystem)是草地生态学的主要研究内容，如何使草地生态系统实现高效、平衡和持续发展，以维持草地生态系统的稳定，是研究草地生态系统的主要目的。

草地生态系统是在一定草地空间范围内共同生存于其中的所有生物(即生物群落)与其环境之间不断进行着物质循环、能量流动和信息传递的综合自然整体(周寿荣 1996)。

系统可分为天然系统、人工系统和复合系统。天然系统是自然物天然形成的；人工系统是人工创建的；复合系统是天然系统和人工系统的结合体。草地生态系统包括天然草地生态系统、人工草地生态系统及两者结合的复合生态系统。

按系统组成成分的自然属性，还可划分为无机系统、有机系统和社会系统。无机系统由自然界的无机物质组成，也称无生命系统；有机系统由生命物质组成，如微生物系统、植物种群系统和动物种群系统等，草地生态系统由无机系统与有机系统组成；社会系统是由人群组成的，它又无时无刻地对草地生态系统发生影响。

以系统存在的状态和时间的关系，可分为动态系统和静态系统。动态系统的状态随时间而变化。不随时间而变化状态的系统为静态系统，自然界和社会中的静态系统只是某一时候的暂时现象，真正的静态系统是没有的。草地生态系统是一种动态的系统。

(二) 草地生态系统的组分和结构

概括而言，草地生态系统是由生物因素和非生物因素组成的。生物因素包括植物、 动物和微生物；非生物因素包括土壤、无机盐类、水和二氧化碳；在它们之间进行着物质循环和能量流动。草地生态系统还受生物因素和非生物因素的影响。人类是主要的生物影响因素，气候是主要的非生物影响因素。草地生态系统的组成成分和影响因素及它们之间的相互关系如图 5-11 所示。

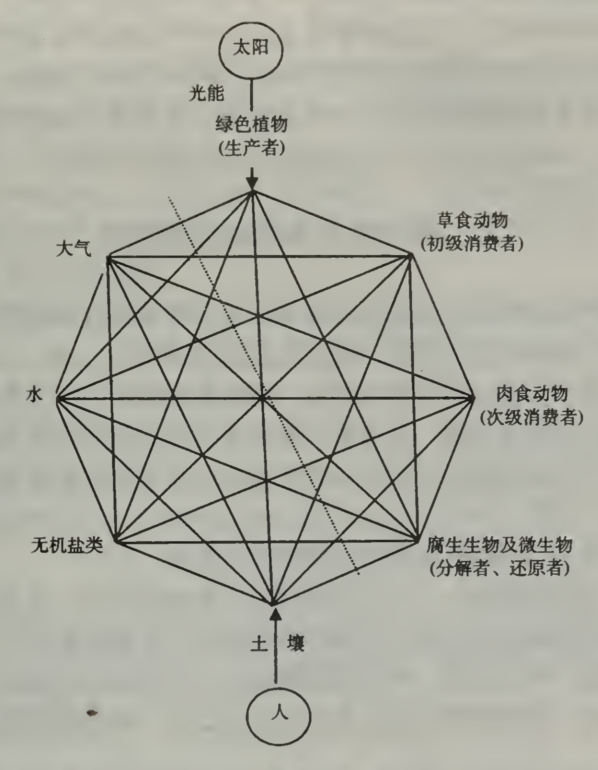


图 5-11　草地生态系统的组分、影响因素及其相互关系(仿 Cook　1970)

草地生态系统同所有的生态系统类型一样，其营养结构可分为：生产者、消费者、分解者和环境四个部分，前三者为生物成分(biotic component)，后者为非生物成分(abiotic component)。草地生态系统的结构模型如图 5-12 所示(周寿荣　1996)。

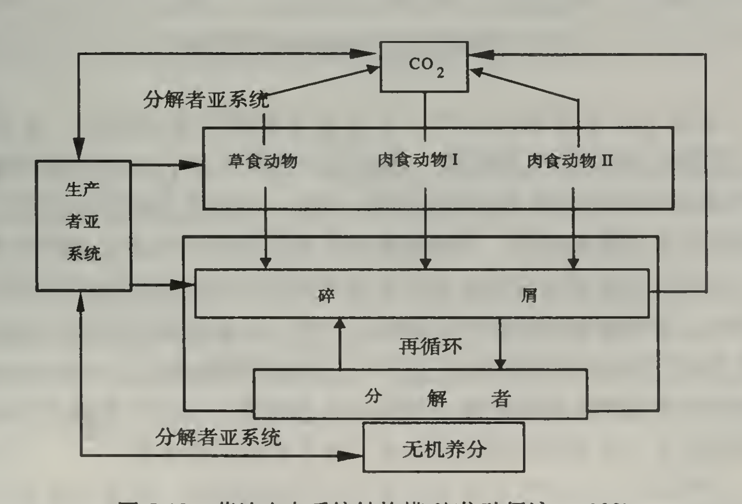


图 5-12　草地生态系统结构模型(仿孙儒泳　1992)

草地生态系统的生物生产有两个过程，一是生产者的生产过程，一般把它称为第一性生产(primary production)，二是消费者的再生产过程，叫第二性生产(secondary production)。分解者的主要功能是把复杂的物质分解为简单的无机物，为分解过程。

草地生态系统是生物种间和生物与环境间协调、持续共生和相对稳定的系统，它是地球上生物与环境、一些生物与另一些生物长期协同进化的结果。

二、草地生态系统的能量流动

在特定的时间和空间范围内，能量在草地生态系统各组分内或各组分单质中运动与转移，是一种连续的动态过程，因而，形成能量流动(能流)。

按照能量生态学的观点(祖元刚 1987)，以能量流动作为一条主线，将生命有机体与能量环境之间进行的能量交换；生命有机体通过体内的生物化学反应而进行的能量代谢；生命有机体利用积累的能量，形成各种含能产品所进行的能量生产等诸多动态过程有机地联系在一起。因而，探讨草地生态系统的能量流动，就是要在整体上综合分析以揭示生命系统与环境之间的能量关系和能量运动的规律。

草地中家畜、动物和植物，一生中都起着贮存势能的作用。在采食和被采食中，将这种来自其他生物的能量传递下去。生命的维持过程，需要能量支出，更多的能量释放在生物本身的"活动"中，因此，有些原有能量由于呼吸作用而耗散。草地生态系统是一个能量开放的系统，要维持草地生态系统的正常运转，该系统必须接受源源不断的能量。

草地生态系统中的能量流动过程是通过食物链和食物网进行的。不论是生产者还是消费者，其中某一种群的数量突然发生变化，必然牵动整个食物网，在食物链上反映出来。人为地摘掉食物链中的某一个环节，将使生态平衡失调，甚至使生态系统崩溃。因此，研究食物网各营养级的能量关系，利用动物间的相互克制，借天敌来控制有害动物的危害是有重要意义的。

三、草地生态系统的物质循环

任何一个草地生态系统都从大气、水体或土壤获得营养物质，通过绿色植物吸收，进入生态系统，被生物重复利用，最后又归还给环境，这就是物质循环。物质是不灭的，物质总是处于周而复始的循环之中，这一点不同于能量流动中的能量不断减少。同一物质可以在食物链的同一营养级中被各种生物多次利用，也可以从一个生态系统中消失，又在另一个生态系统中出现，在生物和非生物之间出现多次循环。自然界中的物质是有限的，营养物质的多次利用和循环再生，是生态系统的基本功能之一。

草地生态系统在生物的生命活动过程中，所需主要物质由 30~40 种的化学元素组成。各种元素在生命过程和物质循环中均有各自的特性，它们对草地生物的作用各自不相同。根据各种化学元素循环的属性可分成三种主要的循环类型：

水循环：在草地生态系统中，水是生命物质存在的条件，能量传递和物质循环的介质。生产者即绿色植物是水循环的一个重要环节。草地植物光合作用和蒸腾作用中都有

水分的参与。从土壤进入植物体内的水，有 95%~97%通过蒸腾损失掉，同时还通过细胞壁排出水气。森林和草原生态系统在促进水循环上，具有十分重要的作用，它把自然界的水分大循环，引入到生态系统的水分小循环中，提高了水的利用效率，也提高了水的质量。维持水量平衡，即降落的水量与流失、蒸发所输出的水量平衡，才可保持草地生态系统的物质输入与输出的平衡。

气态循环：各种物质的主要蓄库是大气和海洋，气态循环紧密地把大气和海洋连接起来，具有明显的全球性循环性质，以氧、二氧化碳、氮为代表，还包括水蒸气、氯、溴、氟等，都属于气态循环。

沉积循环：沉积循环的主要蓄库是岩石圈和土壤圈。沉积物主要是通过岩石的风化作用和沉积物本身的分解作用，转变成生态系统可利用的营养物质。沉积物转化为岩石则是缓慢的物质移动过程。因此这类循环是缓慢的、非全球性的、不显著的循环。以磷、硫、碘循环为代表，还包括钙、钾、钠、镁、铁、锰、铜、硅等，其中磷循环最典型，它从岩石中释放出来，最终又沉积在大海中并转变为新的岩石。

四、草地生态系统的信息传递

信息传递有协调草地生态系统一个组分内各成员及各组分之间的联系，使之共同进行功能运转，把生态系统各组分联成一个整体的作用。信息流主要由物理信息、化学信息、营养信息和行为信息组成。

1. 物理信息

光、声音、温度、湿度和颜色等均属于草地生态系统的物理信息。这些信息有两种作用，其一是起着组分内和组分间各种行为的调节作用。如鸟类的鸣叫，青蛙的鸣叫，蝴蝶的飞舞，花的颜色，某些动物的颜色和形态等都有吸引异性、种间识别、威吓和警告等作用。其二是起着限制生命有机体行为的作用。例如光强度、温度、湿度、日照等物理信息都对生态系统中生物生存或试图生存施加信息和影响。温湿程度的信息可以给生产者和消费者传来某些行为限制，预示生存的适应度和某些生理过程的效率。

2. 化学信息

生物化学代谢产生的物质，如酶、维生素、生长素、抗菌素和性激素均为传递信息的化学物质。虽然它们的数量很少，但作为传递的信息，对生物种间和种内关系都有深刻的影响，有的相互克制，有的互惠，有的相互排斥。近年来，关于化学信息的研究颇有进展。如草地生态系统中蚂蚁的嗅觉特别灵敏，它们可以敏感地接受到食物发出的刺激信息，从而决定其行动的方向与位置。又如昆虫之间都存在着相互联系的方式，以保证它们有秩序地集体行动和抵抗外敌。这种信息为化学物质，又称为信息素。昆虫的信息素种类最多，有报警、集合、搜索食物和性信息素等。生态学家曾利用性信息成功地诱杀农业害虫。

3. 营养信息

食物和养分也是一种信息。草地生态系统中草本根茎植物的根茎部分有把枝条“安置”在营养丰富小生境的能力，这主要靠它们接受小生境发出的营养信息，而根茎这种调节与安置枝条在营养丰富小生境是通过根茎变长或变短，以及根茎分枝的多少来实现的。同时枝条也可接受小生境营养源的信息流。

生态学家们发现，草地生态系统的捕食者对被捕食者生产力和种群密度及结构有调节作用，这主要是通过捕食技巧来实现的。而捕食技巧来自于被捕食者的营养信息。这种营养信息告诉捕食者怎样才能以最小的代价换取最大量的捕食食物，并且始终维持捕食者和被捕食者种群的平衡。

4. 行为信息

草地生物的生理活动、生活习性和功能都有一定的周期性变化，表现为一定节奏性，这种现象称为“生物钟”。生物钟是一种复杂的生理过程，是生物体内物理变化和化学变化的结果。同一动物种群，两个个体相遇时，表现出有趣的行为信息，可能是识别、威吓或挑战的信号。草地生态系统中这种巧妙的信息传递，形成信息流。目前，对这一功能的研究仍然停留在现象上，对其实质尚待深入研究。

五、草地生态平衡

草地生态平衡是指草地生态系统中生物系统的相对平衡，是把生物间的相互关系与物理的、化学的环境条件，通过能量流动和物质循环及信息传递等过程联系起来的一个整体。一个草地生态系统是其结构和功能相互依存、相互制约的统一体。结构是功能发挥作用的基础，功能又依赖结构来完成。结构和功能的相互适应，相互完善，使生态系统在一定时间内各组分通过制约、转化、补偿、反馈等处于最优化的协调状态，表现出高的生产力，能量和物质的输入和输出接近相等，物质的贮存量相对稳定，信息的控制自如，在外来因素的一定程度干扰下，通过自我调节可以恢复到原初的稳定状态。

任何一个草地生态系统都具有一定的自我调节能力，以保持系统的稳定性和生态平衡。这种调节能力与其成分的多样性、能量流动和物质循环途径的复杂性密切相关。如果一个草地生态系统成分多样，能量流动和物质循环复杂，则较易保持稳定，因为系统的一部分发生机能障碍，可以被不同部分的调节所补偿。但这种自我调节能力有一定的生态范围和条件，如果干扰过大，超过了生态系统本身调节能力的限度，草地生态平衡就会被破坏，这个临界限度，称为“生态阈限”。如今的许多草地退化问题都是由于草地的不合理开发和使用，破坏了草地生态系统的能量流动、物质循环和信息传递，从而超过了草地的“生态阈限”，打破了草地的生态平衡而引起的。

一般来说，人工建造的草地生态系统，组分简单，结构单一，自我调节能力较差，对于剧烈的干扰，如干旱、低温等，反应敏感，生态平衡通常很脆弱，容易遭到破坏。反之，一个成熟的天然草地生态系统，如贝加尔针茅草原生态系统的物种多样性指数高，食物链复杂，能流和物质循环多渠道运行，则系统的自我调节能力很强，生态平衡就容易维持。

第五节　草地畜牧业

一、草地畜牧业概述

(一) 草产业概况

我国草地资源占国土的 41%，草地类型之多和牧草品种资源之丰富居世界第一位(农业部畜牧司全国畜牧兽医总站　1996)。由钱学森先生提出的“知识密集型草产业”就是建立在开发和应用这一资源基础上的。在未来农业科技革命和产业化进程中，如采用草业系统工程的理论和模式，综合开发草地资源，将会有力地推动农业持续高效发展，有效地解决中国农业持续发展中的三大基本矛盾，即：农业发展与人口不断增加、耕地不断减少的矛盾；社会对粮食(包括转化为肉、奶、蛋的饲料粮)需求不断提高与粮食增长有限的矛盾；提高粮食单位面积产量与农业生态恶化(风沙危害、水土流失、土地沙漠化、水资源短缺)的矛盾(李毓堂　2000a)。

草产业是根据现代科技发展和系统工程理论，在农业现代化进程中应运而生的新兴产业。其含义是：在应用现代科技手段开发草资源、种植优良牧草、改良土壤、建立优化生态系统基础上，发展草、牧、农、林、副、渔、工、商相结合的，高度综合的，能量循环的，科学管理的，高层次效益的生产系统(李毓堂　2000b)。草产业具有极大的生态和经济效益，必将成为我国一项新兴支柱产业。我国草资源丰富，有着良好的发展草产业的基础。

草产业有三个基本的子产业：草坪业、饲草业、草地畜牧业。草产业中的草产品主要是指牧草和草坪草。随着城市建设和畜牧业的发展，国内外市场对草产品需求猛增。预计 10 年后，国内外市场需求将达到 2×10^7t。目前，我国草坪草业种植面积、产值、从业人员数量每年正以 20%~30%的数量迅速增长。

牧草产品中，有“牧草之王”之称的苜蓿草，因其含有丰富的蛋白质、氨基酸和维生素 A 等成份，被公认为最好的饲料添加剂。现在，一些国家通过深加工把苜蓿草中的天然激素提取出来，开发出供人们食用的保健品。

专家认为，发展生态效益好的草产业不但可以使农民快速致富，还可带动畜牧业、草产品加工业、食品业等产业的发展，将成为国民经济中一个重要的经济增长点。据测算，河西走廊现有的 10 万亩苜蓿，比种粮增收 2400 万~2900 万元。如果在沙化地、盐碱地和中低产田种植苜蓿，效益会更高。

但我国由于科技水平和生产方式落后，草业至今仍没有形成一项强国富民的产业，与国际水平相比有着明显的差距。如：我国产供销一体化的草产业尚在孕育之中，与国际水平差距很大；牧草种子生产仍停留在小农经济水平上，主要以地方品种为主，质量和数量都不能满足市场需求；草产品加工机械设备落后。据介绍，牧草必须通过收割、保鲜，加工成草捆、草块、草粒和草粉等精饲料，才能进入市场。目前我国已开发出了牧草收割机、播种机和低密度打捆机等机械设备。但草产品加工最关键的烘干设备和高密度打捆机具，一直依赖进口。目前，国产脱水机每小时只能处理牧草

4~5t，而进口脱水机每小时能处理 12t。我国小片种植的苜蓿草经过脱水处理后，蛋白质含量只有 18%，而美国大田种植的苜蓿草蛋白质含量就高达 28%。一吨苜蓿草蛋白质含量每降低一个百分点，就会损失 100 元，降到 13%，大大失去国际市场；草产业上的科技落后还表现在草坪草种制种业上。据了解，我国至今没有研制成功国产草坪草种子，每年需花费 1000 多万美元进口约 5000t 草坪草种子。草坪业大多停留在低水平的草坪建植方面，对草坪的养护、病虫害防护、逆境生理研究、品种选育和特种草坪等方面研究开展很少，整体水平亟待提高。

农业部畜牧兽医司草原处王晓斌认为，我国草业落后的另一个重要原因是草业生产方式落后，草品种植高度分散，难以形成规模，达不到国内外加工企业的需求，这也迫使我国大量进口“洋草”。

因此，我国草产业要想发展成一大支柱产业，必须进行脱胎换骨，从种植、收割、 加工到销售等环节都要按农业产业化的规律，进行彻底的变革。目前，我国正在大规模地实施西部大开发，我们应抓住退耕还草的战略机遇，努力把草产业发展成为我国一大支柱产业。

（二）草地畜牧业概况

草地畜牧业作为草产业的核心，对于生产优良牧草、培育优质畜产品、增加社会物质财富、促进国家经济发展方面具有重要作用。据联合国粮农组织 1971 年统计，占世界陆地面积 10.6%的耕地提供人类食物的 88.5%。草地提供人类食物的 10.8%，其余 0.7%从水域获得。畜牧业发达的国家，在肉类总产量中，草食动物生产的肉类占 38%~93%(李博等 1991)。

改革开放 20 年来，我国经济持续发展。随着人们生活水平的提高，对优质畜产品的需求不断增加，居民畜产品的消费结构也发生了巨大变化。据对城市不同收入组的调查，高收入组比低收入组更喜欢消费奶制品、羊肉和牛肉，对猪肉和禽蛋的需求下降(表 5-2)。从 1990~1997 年，我国猪肉在猪牛羊肉总产量中所占比重由 89.8%下降到 83.4%；牛肉产量由 170 万 t 增至 450 万 t，增加 2.84 倍；羊肉年产量由 98 万 t 增至 230 万 t，增加 2.34 倍，我国草地畜牧业生产形成了较快的发展态势和较强的发展后劲。

表 5-2　不同年份我国猪牛羊肉生产的相对变化（单位%）

年 份	猪+牛羊肉	猪肉占总产	牛肉占总产	羊肉占总产	比例：猪肉：牛羊肉
1979	100	94.26	2.16	3.58	16.64：1
1985	100	93.98	2.65	3.37	15.61：1
1990	100	90.75	5.00	4.25	9.82：1
1993	100	88.50	7.24	4.26	7.70：1

引自关秀清　1997

在漫长的历史岁月中，由于自然选择和人类活动的影响，草地上的野生动物，无论是种类和数量，均已发生很大变化。但现在，在广袤的草地上仍然有许多飞禽走兽和各种野生动物。如果实行合理保护和猎取，进一步研究它们在生态系统中的地位和给予科

学的调控，将会诱导出对人类更有益的生态效果。我国草地面积广，今后仍旧是发展畜牧业的重要基地，其潜在的生产能力很大，如能正确保护，科学地投人，其生产力可数倍以至数十倍地增长，将为人类提供更为丰富的动物产品(周寿荣　1996)。

二、牧　　草

牧草(forage grass)是家畜良好生长的基础，在草地畜牧业这一产业中，不应忽视牧草这一基本饲料的地位和作用，所以首先应考虑牧草的特性。

(一) 牧草的季节生长模式

在大多数国家里尽管牧草生长的精确模式可能很不相同，但生长的季节性却是一种共同特征。生长曲线的季节性可能由于收获的步骤、施用的肥料及灌溉措施而变化。在牧草干物质积累速度最快的时期，草的质量却在下降。鉴定牧草质量的最简单方法是看它的可消化性[草地牧草的消化率(D)是家畜采食牧草后，经其消化道消化吸收的牧草中营养物质(N_a)占食入营养物质(N_o)的百分比。即 $D= N_a/ N_o \times 100\%$。若按干物质(DM)或有机物质(OM)计，则为 $D_{DM}=DM_a/DM_o \times 100\%$，$D_{OM}=OM_a/OM_o \times 100\%$。如按牧草中所含营养物质如粗蛋白质、粗脂肪、粗纤维和无氮浸出物计，则公式依上类推](任继周　1998)。春天幼嫩的牧草其质量最高，随着植物物质年龄的增长而降低，用可消化的有机物质来表示的动物食物的生产，是干物质增长和可消化性降低的结果，其他生长季节也是这样。

(二) 牧草的化学组成

下列因素对牧草化学组成有很大影响：① 植物的生长阶段；② 草地的植物组成；③ 土壤的营养状况；④ 气候因素；⑤ 草地的经营管理(Tribe et al.　1963)。因而牧草干物质的组成通常变化很大(Ferguson　1963)。粗蛋白质含量占干物质的比重从 3%而变动到 30%，粗纤维则为 20%~40%，含水量变化于 65%~85%之间，碳水化合物总量为 4%~30%，纤维素含量变化于 20%~30%范围内，半纤维素为 10%~30%。

Spedding(1969)对最重要的禾草和豆科牧草的化学组成进行了总结。绿色牧草特别富含胡萝卜素(干物质中高达 550μg/g)，为维生素 A 原，通常还含有维生素 D 原。牧草的矿物质含量如表 5-3、表 5-4 所示。可看出，豆科植物往往含有较多的钙、铜、钴；禾草则富含二氧化硅。

表 5-3　多年生黑麦草的矿质组成表

磷	0.26~0.42	干物质的%
钾	1.98~2.50	干物质的%
钙	0.4~1.0	干物质的%
镁	0.09~0.25	干物质的%
硫	0.13~0.75	干物质的%
钠	0.10~0.57	干物质的%
氯	0.39~1.30	干物质的%
铁	50~200	干物质的μg/g
锰	22~200	干物质的μg/g
锌	15~60	干物质的μg/g
铜	5.4~8.5	干物质的μg/g
钴	0.15~0.16	干物质的μg/g
碘	0.22~1.45	干物质的μg/g
钼	可用资料不足	
硒*	0.1~1.0	干物质的μg/g
铅*	0.3~3.5	干物质的μg/g
氟*	2~16	干物质的μg/g
二氧化硅	0.6~1.2	干物质的μg/g

*表示的数字并非仅适用于黑麦草，也适用于整个“牧草”。

引用数字为文献中的平均值范围，引自(Whitehead　1966)

表 5-4　白三叶草的矿质组成

磷	0.25~0.40	干物质的%
钾	2.09~3.11	干物质的%
钙	1.36~2.10	干物质的%
镁	0.18~0.24	干物质的%
硫	0.24~0.36	干物质的%
钠	0.12~0.41	干物质的%
氯	0.62~0.91	干物质的%
铁	117~291	干物质的μg/g
锰	51~87	干物质的μg/g
锌	25~29	干物质的μg/g
铜	7.3~8.7	干物质的μg/g
钴	0.13~0.24	干物质的μg/g
碘	0.14~0.44	干物质的μg/g
钼	0.64	干物质的μg/g
硒	0.005~153	干物质的μg/g
铅	与禾草的数字相似	
氟	数据不可用	
二氧化硅	为禾草数据的 5%~10%	

引用数字为文献中的平均值范围，引自(Whitehead　1966)

牧草含有食草动物所需要的多数矿物质，矿物质的缺乏常常是由于另外一些元素的过量(例如钼和硫酸盐过量时铜就缺乏)或是由于其不可利用性(常见于镁的缺乏)。其他

常见的如缺碘(Calderbank　1963)及缺钴，钙和磷不平衡也是一个重要问题(可能与维生素 D 的缺乏有关)(Spedding　1983)

另外，某些动物有特殊的要求，许多鹿每年换角(如赤鹿(*Cervus elephas*)的雄鹿)，而这就对矿物质提出了额外的大量要求，这些矿物质从所食的牧草中是难以得到满足的。因此，雄鹿有时就去吃那些掉下来的角及骨头(Harrison Matthews　1952)。

其他的重要成分包括雌性激素(Bickoff　1968)及与草地的禾草或杂草有关的各种物质(Garner　1963)。

(三) 牧草质量的地区差异

牧草的质量与草地类型有关(表 5-5)。

表中所列材料可看出，干草原和荒漠草原中的粗蛋白质含量高，正弥补了其产量低的缺点，而且这些草地更适于绵羊对蛋白质的需要，这些地区适合发展绵羊，而野草地中的粗蛋白质含量较低，更适于养牛。

表 5-5　不同草地的化学成分差异(占干物质)

地名	牧地类型	粗蛋白质 /%	粗脂肪 /%	无氮浸出物 /%	粗纤维 /%	粗灰分 /%	能量(以干重计) /(kJ/g)
保尔干	荒漠草原	14.6	6.6	46.2	20.5	12.1	19.83
哈拉林	干草原	13.1	3.4	47.2	28.7	9.6	19.59
日本宫崎	野草地	9.5	3.7	48.7	28.9	9.6	18.61

引自岩田悦行　1980

牧草营养成分还受海拔高度的影响(表 5-6)。

表 5-6　不同海拔高度禾本科草化学成分(占干物质的%)

海拔 /m	植物种数	粗蛋白质	粗脂肪	粗纤维	粗灰分	无氮浸出物	钙	磷	分析样品数
400~1900	33	8.08	2.21	33.99	9.15	46.02	0.43	0.26	56
2000~2900	4	9.61	2.79	33.12	7.27	45.19	0.23	0.23	7
3000~3900	28	8.97	2.52	36.20	5.97	46.94	0.21	0.21	70
4000~4900	7	10.73	2.88	31.62	6.12	48.35	0.18	0.18	11

引自周寿荣　1993

从表中所列材料看，禾本科牧草粗蛋白质含量随海拔升高而上升。这也可看出海拔高的地方牧草蛋白质含量高，也弥补了其产量低的缺点。川西北高原绵羊和牦牛能良好生长发育，与牧草质量有一定的相关关系。

以上可看出牧草质量的地区差异。在发展草地牧业生产时，只有与牧草质量的地域差异相适应，才能获得良好的生态经济效益。

(四) 牧草的营养状况随种类组成、时间和空间而变化

牧草的营养状况是随种类的组成、时间和空间而变化的，这种变化是由许多的科学研究和实践经验总结出来的，其中主要的变化概括如下：

1) 一般而言，豆科牧草比禾本科牧草有更高的饲用价值，当其成熟时还保持较高的蛋白质含量。由于它们固氮的重要性，豆科牧草在草场植物群落中是一种重要的类型。

2) 经大量测定结果表明，放牧时植物的生长阶段对牧草质量有重要影响，饲用价值随植物生长而下降。

3) 放牧地的质量与季节降雨模式密切相关，降雨开始时牧地质量上升。在干旱季节，植物接近凋落，放牧地质量迅速下降。

4) 牧场质量也受土壤状况和植物种类差异等因子的影响。

5) 饲用植物不同有机物质的含量随季节而变化，最典型的是：植物老熟时，粗蛋白质和可消化粗蛋白质的含量减少，碳水化合物含量增加。特别是：植物成熟时纤维素含量增加，饲用价值大为下降。

6) 当植物成熟时，矿物元素发生的典型变化是：磷下降；钙通常在禾草中下降；钾一般也减少；镁下降；硫不断减少；钠在不同植物种类中表现不一。

7) 牧草蛋白质含量是饲料质量的大体指标，对动物影响甚大。高的蛋白质含量与高的消化性和高的营养价值相联系。蛋白质缺乏和与之相连的矿物质营养(特别是磷)的不足，常常是动物生产的主要限制因子。在干物质中，6%的粗蛋白质含量，仅够动物维持生命的需要；生长和产乳的牲畜则需要较高的水平。粗蛋白质含量低于 6%的饲料，表明蛋白质的不足。

三、草 地 动 物

草地上丰富的植物种类为各类草食动物提供了多样性的食物，因此草地动物(leimocole)也是丰富多彩的。

(一) 大型草食动物

在草地动物区系中最引人注目的是大型草食动物，它们是草地生态系统中最主要的消费者。目前，世界范围内的大型草食动物主要归 6 个目，20 个科。对大型草食动物尤其是家畜的研究，是草地生态学的重要内容(李博　1990)。

草食动物的生长速率受动物本身的遗传特性及饲养条件所制约。

1. 反刍动物

成年反刍动物的特点在于它的胃分成了四部分：网胃、瘤胃、瓣胃、皱胃。前两部分在成年畜中构成了一个大器官，在其中进行着食物的细菌发酵。由于唾液的不断流

入，瘤胃壁的有节奏收缩、回吐和反刍及大量细菌和原生动物(10^6/ml，McDonald，Edwards and Greenhalgh　1966)的存在而使该细菌发酵过程得到加强。

所有的反刍动物(ruminant)都需要水分、矿物质、一定的维生素、蛋白质和能量。水分具有重要意义：幼畜体内含有 75%~80%的水分，而成年育肥状态下含 50%。反刍动物需要钙、磷、钾、钠、氯、硫、镁、铁、锌、铜、锰、碘、钴、钼及硒，也需要氟、溴、钡及锶。其中一些吸收过量时会发生毒害，如铜、硒、钼及氟(Underwood 1962)。成年反刍动物的食料可以不需要某些维生素，例如复合维生素 B 就是在具备必需原料的条件下由瘤胃内的细菌合成的。就主要蛋白质和能量而言，反刍动物所具备的消化系统是能够从很粗的饲料中满足其需要的，但对于可溶性碳水化合物及蛋白质的利用效率却较低(Phillipson　1963).

我们以牛为例，来说明反刍动物的采食特性。

牛以其舌头卷入牧草，用其下牙和上齿龈形成咬的动作而把草咬断食入。它们不像其他种类牲畜那样选食牧草，而倾向于牧食低矮植物的顶部。它们喜食禾草和杂类草，但在干旱的气候条件下，当低矮草类干枯时，它们可采食灌木，因此，在干旱的不利条件下，它们也能采食达到良好的营养水平。

2. 非反刍动物

大量非反刍动物吃草地牧草，其中有些动物在它们的食料上几乎等于是专化的，而另外一些动物则完全不靠牧草生活，或仅仅依靠草地植物的某些部分为生。现以羊为例说明主要以草地牧草为主食的动物，举出猪作为不适应这种主食的动物。

绵羊有薄而灵活的嘴唇及善于咀嚼饲料的臼齿，采食方便，适于牧食靠近地面的矮草。在低草层以禾草为主的地区，绵羊与黄牛竞争性很大。绵羊需水较少，在一些缺水的地区，它们也能生长良好。由于它们具备有效地选择牧食的能力，如果让它们在一个地方以很大密度长时间放牧，会引起植物群落的很大破坏。如果以正确的比例与其他种类牲畜一起放牧，能在对可利用牧草更为充分利用的情况下得到良好的生态效益和经济效益。

山羊喜食灌木和乔木的叶、嫩枝，甚至树皮，这与绵羊和牛不同。由于它们有依靠灌木和乔木枝叶生长繁育的能力，所以山羊能在那些低草层由于过度放牧土壤剥蚀的地方成为优势的牲畜，可以转化那些极度易被浪费的能量，也能帮助人们控制不需要的高比例的木本植物。

猪具有较简单的消化道，没有专门机构来处理含纤维的食物。然而，在其大肠和盲肠中有很大的微生物活力，维生素在那里可被分解到一定程度。幼嫩牧草对猪饲料的贡献更大一点，据 Eyles(1963)估算，新鲜幼嫩牧草所能提供的每日干物质摄取量的百分率，对离乳仔猪和哺乳母猪约为 10%，对肉用猪和妊娠母猪约为 30%。

(二) 小型草食动物

小型草食动物的种类甚多而且数量可观，它们遍布于草地的地上与地下部分，并以

植物的茎、叶、液汁、果实、根茎和根为食。在众多小型草食动物中，草地昆虫的数量最引人注目。在英国石灰岩草地上，鞘翅目昆虫每平方米达 42~196.5 个个体，波兰人工草地的双翅目昆虫每平方米达 29.2~618.2 个个体。其他无脊椎动物的数量亦甚多(李博 1990)。

小型草食动物的食物摄取量也相当可观。据 US/IBP 测定，吸食昆虫类每天每毫克体重吸取 108~720mg 植物汁液；节肢动物每天每克体重消耗 0.15~3.55g 植物物质；而羊的相应数字仅为 0.10~0.12g。它们在单位面积上的食物能消费量随草地类型及种群数量的变动而不同。

小型草食动物的数量随季节、年份而变动，其中最引人注意的是年际波动，不同种或不同类群之间均有其特定的波动周期。如草原上的旅鼠每 3~4 年一个周期，一般每公顷达 3~50 个个体，现存量(鲜重)0.024~0.4g/m^2，高峰时每公顷达 330 个体，现存量达 2.6g/m^2。据实验研究，这种波动主要因遗传和习性的变化引起，而与营养无直接关系。 在人为扰动较少的天然草地上，这种波动一般不会引起草地的明显变化，而且，小型草食动物的多样性越高，草地生态体系就越稳定。但是，由于草地环境或草地管理体制方式的改变，草地组成简化或种数的减少，常引起同一食性种类的骤增，并可导致草地生态系统的破坏。因此，在过牧与退化草地上，常可见到因某一种群的爆发而引起的危害。

(三) 肉 食 动 物

草地上的肉食动物是各式各样的，从大型哺乳类到小型节肢类俱全，其中数量最多的是小型无脊椎动物。

肉食动物的数量与生物量取决于草食动物的数量，在北美矮草草原上，每克肉食动物需 146g 草食动物来维持，东非稀树草原上，每 333g 草食动物量维持 1g 肉食动物量。草食动物的多少又决定于植物产量，因此，肉食动物量最终决定于植物产量与环境肥沃度。

草地的任何管理措施均对肉食动物的数量产生重大影响。如增加利用强度，肉食者的生物量则明显减少；如施加改良措施，尽管植物产量与动物总产量均有增加，但肉食动物量亦趋于减少。如北美高草草原，未利用情况下，肉食无脊椎动物量达 15.1~17.3mg/m^2，而在放牧情况下降至 6.8~11.3mg/m^2；矮草草原灌溉后，总动物量增加了 38.7%，而肉食动物量反而减少 23.1%。

四、载 畜 量

(一) 载畜量概念

我国北方草地利用的历史已经超过三四千年，然而直到最近 30 多年才出现越来越严重的大面积退化趋势。1983 年内蒙古自治区退化草地面积占可利用草地面积的

35.6%，到 1995 年已扩大到 60.1%，其中过度放牧是造成我国北方草地退化的最重要原因(李博　1997a)。实际上，这种状况是一种全球普遍性现象，据 Oldeman(1981)等人估计，全球退化土地面积中的 34.5%都是由于过度放牧引起的。

草地是一类重要的可更新资源，大面积的草地退化已使人们越来越认识到草地的承载力是有限的。牲畜超载放牧导致大面积退化和荒漠化，所以我们要考虑草地牲畜放牧的强度必须保持在怎样的范围才不会导致草地退化和荒漠化，这就是草地载畜量问题。

载畜量(stocking capacity)概念在近一个世纪的发展过程中，出现过形形色色意义相近的术语和定义。根据 1989 年美国《草原管理名词术语汇编》给出的权威定义，载畜量是指在与维持和改进植被资源并行不悖的条件下，一定面积草地牧场上可能饲养的家畜头数。

在载畜量的具体确定上，有家畜牧草需求法、家畜营养需求法等多种方法，但都是循着“牧草可采食率—牧草可采食量—载畜量”的基本思路(王明玖等　1994)。最近又有学者提出生态学视角下的草地载畜量概念(黄富祥　2000)，主要以防止草地退化和荒漠化为基本出发点来确定载畜量，并且是循着“植被有效覆盖度—牧草可食率—牧草可采食量—载畜量”的思路来确定。

载畜量的表示方法有三种(任继周　1998)，分别为：① 家畜单位法。在一定的时间内，一定面积草地可以放牧的家畜单位数，世界上多数国家采用牛单位，中国和新西兰等国采用羊单位；② 时间单位法。在一定的草地面积上，可供一个家畜单位放牧的天数或月数，即家畜单位天，家畜单位月等；③ 面积单位法。在一定的时间内，放牧一个家畜单位所需要的草地面积。中国的草地面积单位(王栋　1955)是在放牧期间能供给一头体重 40kg 的母绵羊及其哺乳羔羊所需的牧草而不必加喂其他饲料的草地面积。

(二) 草地气候生产潜力与载畜量

生产力是草地生态系统研究的核心问题。只有对草地的生产力有清楚的研究，才能正确估计草地的载畜量和正确评价草地畜牧业生产的可持续发展状况。

首先是草地的第一性生产力，这是评价草地生态系统生产力的基础。绿色植物通过光合作用形成有机物质，同时通过酶的作用把太阳能转变为化学能贮存于有机化合物中，绿色植物的这一转化速率即是第一性生产力。在自然条件下，它主要受气候因素所制约，所以也称为草地气候生产力。一般来讲，从海洋向内陆，随着雨量的减少，第一性生产力有规律地降低；如果供水充足，在年平均气温-2~26℃之间，温度越高则生产力亦越高(李博　1980)。如草原处于中纬度半干旱条件下，生产力中等偏下。就全世界范围讲，据现有报道，草原第一性生产力以干物质计介于 50~130g/m^{2}之间。

草地的第二性生产力是指一定时期内单位面积草地上第二性生产者(各级异养动物)，利用第一性产品形成动物物质(包括动物本身及其产品)的能力(周寿荣　1996)。一般用某一单位时间和(或)单位面积畜产品的产量或家畜增重表示。如产奶：kg/(hm^2·a)或 t/(hm^2·a)或 kg/(头·d)；产肉：kg/(hm^2·a)或 t/(hm^2·a)或 kg/(头·d) (平均每头日增重)。

自然状况下，理论载畜量是依牧草地上年产量的有效利用状况、家畜采食量及对牧草的可利用率来计算(李英年　2000)。理论载畜量估算方法为(李永宏　1994)：理论载畜量=草场地上年产量×家畜对牧草的利用率/(家畜(1个羊单位)日食量×365)。

草地生产力与载畜量的确定，是放牧管理的核心问题之一。草地产量与载畜量之间的关系，理论上有三种模式(图5-13)。第一种模式(A)随放牧强度的增加草群产量降低；第二种(B)，达到一定放牧强度水平时才随放牧强度的增加而降低；第三种(C)，先随放牧强度的增加产量上升，达最适放牧强度时产量最高，而后再随放牧强度的增加而降低。

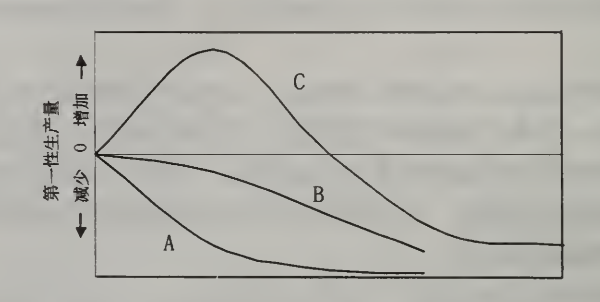


图5-13　草地第一性生产对放牧强度潜在反应(引自 Briske and Heitschmidt　1991)

一个草地生态系统，在没有人为干扰的条件下是自我维持的。其能量输入主要来自太阳辐射，而物质循环几乎是封闭的。如果人们为了追求产品无限制地增加牲畜数量，过多地消耗第一性产品，并随时将产品取走，势必造成生态系统的物质亏缺，导致生态平衡的破坏。所以在利用天然草地时核心是控制载畜量。另外，不同地区、不同草地类型的生产力和载畜量是不同的。应对不同草地类型的生产力和动态进行详细研究，并在此基础上制定最适载畜量。载畜量一旦确定，就应严格执行，坚决制止无限制增加牲畜头数的盲目作法，以保持草地的生态平衡。

五、草地畜产品

英国草地学之父 Davies(1960)指出，“衡量草地生产的惟一尺度是某种形态的畜产品”，草地的生产能力最终要靠一定时期内实际收获的可用畜产品(奶、肉、毛、皮、役畜、役力等)的数量来衡量。

(一) 乳

乳是乳腺的分泌液，是哺乳动物后代出生后短期内的惟一营养来源，以及断奶前的主要营养来源。人们利用草地或其他饲料饲养哺乳动物，从中获取一部分乳作为人类的食物。

乳的成分随动物的种类而不同，且在泌乳初、中、后期也不同(表5-7)。

表 5-7　部分牲畜之间乳汁成分的变化

成分	单位	印度水牛	马	驴	山羊	绵羊
脂肪	g/100g(N×6.28) (N×6.28)	7.45	1.60	1.50	4.50	7.50
非脂肪酸类	g/100g	9.32	8.50	8.60	8.70	10.90
蛋白质	g/100g	3.78	2.20	2.10	3.30	5.60
酪蛋白	g/100g	3.20	1.00	—	2.50	4.20
乳糖 (无水的)	g/100g	4.90	6.00	6.20	4.40	4.40
灰分	g/100g	0.78	0.40	0.40	0.80	0.87
钾	g/100g	—	0.07	—	0.17	0.19
钠	g/100g	—	—	—	0.034(A)	0.046(B)
钙	g/100g	0.18	0.10	0.09	0.14	0.19
镁	g/100g	--	0.01	—	0.02	0.015(B)
氯	g/100g	0.06	0.02	0.04	0.15	0.14
磷	g/100g	0.12	0.06	0.05	0.12	0.15
铁	mg/100ml	—	—	—	0.2 (A)	0.77μg/g
总能	J/100g	4.19×10^5	1.97×10^5	1.92×10^5	—	—

(A)引自 Abrams　1961　(B)引自 Ashton and Yousef　1966

引自 Kon and Cowie　1961

各种哺乳动物从幼畜出生到泌乳早期的高峰，乳汁的生产速率上升很快，以后产量下降，但下降的时间和速度各种动物不同。惟母牛产后第 4 周达到高峰，以后缓慢下降，产乳期很长，达 44 周。这就是选择母牛作为乳用畜的原因，其他动物产乳期短且质量不高。

对产乳效率最有用的单独评价是用单位总取食量所生产出的乳量来表述，以前后两次成功配种之间为计算期间。计算公式为

$$E=P/(F_m+F_p+F_1)\times100\%$$

式中：E 为产乳效率(%)；F_m 为泌乳前怀孕期之间用来维持家畜的饲料(kg)；F_P 为泌乳前怀孕期需要的饲料(kg)；F_1 为泌乳期补充的饲料(kg)；P 为产乳量(kg)。

这个公式用于泌乳期和怀孕期不重叠的家畜(如绵羊)效果较好。计算泌乳效率最好以一个以上的泌乳期为依据，才更为合理。这样就把前一泌乳期的怀孕看成是为下一期泌乳做准备。如果要对不同畜种的产乳效率作比较，取样的数量应该多一些，才有利于消除畜种个体大小带来的误差。

在畜牧业中，不少科学工作者曾设计母牛产乳量效率的表示方法(Brody　1945)，总效率=产品的能量/饲料中 TDN(可消化总营养物质的)能量×100%。

(二) 肉

比起乳来，肉是一个变化更多的产品。肉产品量可用胴体(carcase)的重量来表示。

胴体重占空腹活重的比叫屠宰率，它随动物的种类、年龄、生长速度、特别是膘情(肥瘦)而变化。

胴体除去骨骼为净肉，净肉与胴体之比叫净肉率。净肉则更能表现生产价值和效率。各种动物净肉(去骨)的化学成分有一定差异，不同年龄的动物及其不同部位净肉的化学成分也不一样(表 5-8)。

表 5-8　不同动物净肉的化学成分（单位：%）

动物种类	年龄或部位	水分	蛋白质	脂肪	矿物质
兔	幼龄	—	20.7	3.8	1.5
	成年	65	20.9	6.2	1.3
牛	前肢肉	—	18.3	18.9	0.9
	后肢肉	62	19.3	18.3	0.9
绵羊	肩部	—	15.6	30.9	0.9
	腿部	62	18.7	17.5	1.0

引自 Spedding　1971

肉类生产效率主要表现在以下两方面：一是消耗饲料中每单位蛋白质所生产的人类可食蛋白质的数量；二是消耗的饲料能量所生产的可食能量的数量。

蛋白质生产效率：按每单位被消耗的蛋白质(N×6.25)的蛋白质产量来计算。计算公式：*E*=生产氮量/消耗氮量×100%。

能量生产效率：即消耗的能量及其生产的可食能量之比。

能量效率=后代可食胴体的能量(MJ/年)/被母畜和后代所消耗的饲料中的能量(MJ/年)×100%。

（三）毛、皮

绵羊可以把牧草转化为毛，养绵羊成为农民经营草地的生产内容之一，毛的生产受绵羊品种、生产环境(物理污染、微生物)的影响。毛纤维的化学成分变化很大，可能存在 20 种以上的矿物质，但通常含量较小。

由于毛是一种蛋白质，故表示其效率的适当方法是将毛的生长与消耗的食物蛋白质联系起来，正如 Ferguson(1962)所指出的，毛的生长效率受到饲养水平的很大影响，当日粮中粗蛋白含量(N×6.25)超过 8%(以干物质为基础)时，毛的生长就主要决定于能量的吸收。

能量也可能来自体内的贮藏物，同时正如泌乳期的情况一样，当家畜体重减轻时，毛的生长效率就表现紊乱。因此，食物转化为毛的效率最好以所消耗的能量来表示，并且还需把体重考虑在内。

皮也是草地动物的产品之一。皮占动物活重的比重通常是相当大的。例如，牛饲养到 18~24 个月龄屠宰重量达到 400kg 时所得到的皮就较轻，约重 22kg。环境也影响毛皮和皮革的质量。如皮肤会受到牛蝇(warblefly)蛆的损伤。用以防治害虫和寄生虫的农

药，也会妨碍皮革的质量，也影响其生产效率。

六、实现草地畜牧业的可持续发展

我国草畜产业面临重大危机：巨大的人口压力已使我国天然草业的生产力濒于崩溃。从 20 世纪 60 年代起，北方牧区的家畜头数就已陆续超过其草地载畜临界值，家畜占有草原面积下降 10%~20%。每公顷产牛羊肉 5.25kg，牧草转化率仅 0.5%~1.0%，草原退化面积已占 1/3，且仍以每年 1.3×10^6hm^2 多的速度扩展。开垦草原面积累计达 6.7×10^6hm^2 以上，且仍以每年 2.0×10^5hm^2 多的速度增加。

我国天然草地总体上是利用过重，南北差异大。北方草地大部分已过度利用，南方草地开发利用不足，尚有很大潜力。目前我国草地载畜量合计约 5 亿~6 亿多绵羊单位，超过全年合理载畜量约 20%。北方广大牧区冬季草地已超载 50%，少数地区已超载 1 ~1.5 倍；南方草地大约 30%利用过度，30%轻度利用，40%尚未利用，有待开发。

目前，我国草畜产业发展势头良好。1970~1978 年间，全国畜牧总产值增长指数仅 28.21%，而 1979~1989 年间达到 144.4%，畜牧业占农业总产值比重由 20 世纪 70 年代平均 14%上升到 1989 年的 27.2%。在 1978~1989 年间我国奶蛋产量平均每年以 11.2%、20.4%和 5.3%的速度增长；而同期粮食年递增仅 2.7%。改革前 30 年，我国人均肉类占有量每 10 年才增加 1kg 多，至 80 年代则是每年增加 1kg 多(王辉珠等 1993)。

我国草地资源丰富，但是在草地畜牧业的发展中，长期低投入和高强度利用，只讲存栏数不讲出栏率和经济效益，只重视资源利用而忽视资源保护，致使草地严重过度利用，造成草地大面积退化、沙化和盐碱化，严重制约了草地畜牧业的健康发展。据调查，我国退化草地面积已占可利用草地面积的 1/3，平均产草量下降 30%~50%。草地生态环境的恶化和草地畜牧业经营管理水平的落后，致使草地生产能力远远落后于世界平均水平。目前，我国草地产肉量为 3.69kg/hm^2，产毛量为 0.45kg/hm^2，产奶量为 4.04kg/hm^2，共计为 7.02 个畜产品单位。单位面积草地生产能力相当于世界平均水平的 30%，单位面积草地产值相当于澳大利亚的 1/10，美国的 1/20，荷兰的 1/50。我国草地畜牧业不能走粗放经营的路子，因为它不但解决不了真正的问题，还将造成更严重的草地资源的浪费和生态环境的破坏，威胁着后继的发展过程。所以，我国草地畜牧业正面临着一个重大的转变，即由粗放的传统的畜牧业向集约化草地畜牧业的转变(道尔吉帕拉木 1996)。

发达国家在实现畜牧业现代化基础上进行草地集约化生产。现代集约化草地畜牧业生产是通过增加对草地生态系统的能量和物质的大量投入达到提高草地产品产量的目的。但是，高投入高产出所产生的物质和能源的浪费，以及对环境的污染和畜产品中化学物质残留等问题日益突出，已引起各国的高度重视。我们要借鉴发达国家草地畜牧业现代集约化生产的经验教训，坚持经济发展与生态、社会持续性的协调和统一，为未来的发展创造更好的条件，决不走先污染后治理的路子。因此，草地畜牧业可持续发展定义为：在满足当代人，又不损害后代人满足对优质畜产品需求的发展条件下，采用不会耗尽草地资源和危害环境的生产方式，大力推行现代化改造，减少生产过程中对草地生

态环境的破坏，维护草地、水、动植物遗传资源的草地畜牧业发展战略(常会宁 1999)。

第六节　草地生态学模型

一、模 型 概 述

一个模型是对实体的一种描述，是为特定目的而设计的，它是系统或过程的一种简化、抽象和类比，不再包括原系统或过程的全部特征，但能表述原系统或原过程带本质性的输入、特性和输出。而且提供相似于原系统或过程所处环境条件的表述形式。

草地生态学模型是对草地生态系统的特征、特性和运动规律的定量抽象和概括方式，通过它以获得某种预见。应用模拟模型进行系统分析已成为草地生态学研究的重要手段之一。这一途径使我们有可能把复杂的草地生态系统作为整体研究，并应用于草地的实际管理。

模型可用多种不同的方法归类，最主要的两类是：真实模型和抽象模型。

真实模型是用实物表示的，提供一个真实对象或过程的结构或功能的几乎一目了然的图画。如草地地貌模型、飞机模型和建筑模型等。

抽象模型的主要目的是以易于控制的形式精确地表述实体。数学模型是最常用的抽象模型，是生态学、生物学和各种现代科技领域常用的数学工具。

模型的建造有不同的方法。由于动态模型与静态模型相比，模型内部存在着随时间变化的相互关系，在草地生态学中十分重要且极有价值。因此，只介绍动态模型的建造步骤：① 列出模型主要组分的名单；② 建立表示这些组分相互关系的流向图；③ 把各实际数值与各组分及其相互关系联系起来。复杂的模型需用计算机处理。

二、流向图举例

以 Spedding(1971)的牧场污染为例。该模型是在研究放牧牛的粪便对牧场污染问题时作为一种简单的一种近似而建造的。如图 5-14 所示，方框或长方框用来表示物理的等级(levels)，如果使系统静止，这些物理量至少在理论上在任一给定时间都能够度量。等级用实线连接起来，指示物质流，而流动率则以跨越于实线上的阀门状符号表示。如果使系统停止，据定义，流动率将为 0，虚线表示与物质流不同的信息流。圆圈是辅助符号，用来指示相互作用与“反馈”回路，并在必要时简化关于速率的代数式，以适合于所采用的计算机程序中的标准方程的形式。

图中，污染率从一个未详细说明的源馈入，以产生牧场上的污染等级或污染面积。假定污染率与放牧率相关，而放牧率控制着每天被污染等级或污染面积的比例。被称作“潜在污染”的辅助因素不仅和放牧率有关，而且也受多种沉积物的影响，而沉积物本身又取决于在空间的沉积模式和已污染的面积。“污染消除”(decontamination)在过程上是类似的，这里把牧草再次变得对放牧动物可口算做“污染消除”，从图中可看出每天污染消除的部分受降水及牧场是否在每一放牧阶段之后“剃除”剩余牧草所影

响。为了把污染消除部分换算成绝对比率，考虑了任一给定时间的污染面积，并用虚线表示出来，这种虚线在图解中把“污染面积”和“污染消除率”连接起来。

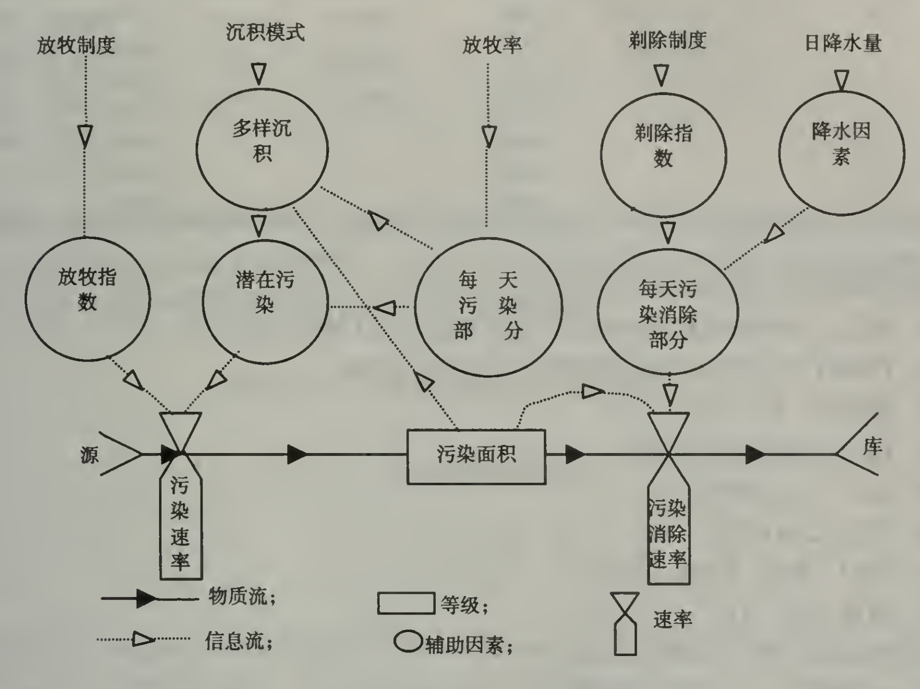


图 5-14　牧场污染流向图(引自 Spedding　1997)

三、计算机建模举例

一年生黑麦草和紫云英混播生长的竞争，应用 Lotka-Volterre 微分方程建模(引自周寿荣　1996)：

$$dr_b / dt = G_b(r_b - r_{b2} - r_b r_0)$$
$$dr_0/dt = G_0(r_0 - r_{02} - r_b r_0)$$

式中：r_b 为黑麦草的相对空间，r_0 为紫云英相对空间。相对空间是一种无维变量，表示可得的根、叶空间，营养物、日光等有关因素，拥挤影响的特性。干物质的实际生产量于是可得自“相对空间”和单作密植的最高可能产量的乘积。为模拟时间的竞争，把系数 G_b 及 G_0 作为时间的经验函数示于表 5-9。这两种函数代表无竞争时，相对应的植物增长率，可从种子密度极低的实验性种植中加以测定。

表 5-9　黑麦草及紫云英的经验增长率

日数	相对增长率	
	黑麦草	紫云英
0	0.4281	0.7143
7	0.1071	0.1190
14	0.0 441	0.0634
21	0.0225	0.0431
28	0.0064	0.0242
35	-0.0036	0.0511
42	-0.0065	0.0491

据数学模型作出其 BASIC 程序如下：

```
10  REN   COMPETITION BETWEEN RYE AND MILKVETCH
20  PRINT "SOWING DENSITITES IN ROW 1CM"
30  INPUT   D1, D2
35  PRINT\ PRINT\ PRINT
40  LET   S1=3.0*D1
50  LET S2=9.0*D2
60  DIM   P(I), R1(I), R2(I)
70  FOR   I=1 TO 7
80  READ   P(I), R1(I), R2(I)
90  NEXT   I
100  LET   I=0
110  FOR   I=1 TO 42
120  FOR   J=1 TO 100
130  FOR   K=2 TO 7
140  IF   T>P(K)   THEN   180
150  LET   G1=R1(K-1)+(T-P(K-1)*(R1(K)-R1(K-1))/7
160  LET   G2=R2(K-1)+(T-P(K-1)*(R2(K)-R2(K-1))/7
170  GO   TO   190
180  NEXT   K
190  LET   S3=S1*(1-S1-S2)*G1*0.0)
200  LET   S4=S2*(1-S2-S1)*G2*0.0)
205  LET   S1=S1+S3
207  LET   S2=S2+S4
210  LET   T=T+0.01
220  NEXT   J
230  PRINT   I,   G1,   G2,   S1,   S2
240  NEXT   I
250  STOP
251  DATA   0,   0.7143,   0.4286
```

```
252  DATA  7,  0.1190,  0.1071
253  DATA  14, 0.0634,  0.0441
254  DATA  21, 0.0431,  0.0225
255  DATA  28, 0.0242,  0.0064
256  DATA  35, 0.0511,  -0.0036
257  DATA  42, 0.0491,  -0.0065
300  END
```

从这一程序的计算结果得知，黑麦草先迅速生长而后平衡，紫云英相反。当两个种生长一处时，可得空间是不成比例的，在较早的阶段为黑麦草所占据，到了紫云英开始增长时，就没有足够的空间容纳它们，竞争便逐渐加强。

第七节　草地退化与荒漠化

一、草地退化概述

(一) 草 地 退 化

草地退化(degeneration)是荒漠化(desertification)的主要表现形式之一。我国有 $4.0\times10^{6}km^{2}$ 不同类型的草地，其中 90%以上处于不同程度退化之中。最新的《中国环境状况公报》数字表明，全国草地退化、沙化、盐碱化呈发展趋势。草地严重退化面积 $7.36\times10^{5}km^{2}$，沙化草地面积超过 $1.5\times10^{6}km^{2}$，比全国耕地面积的总和还多。草地缺水面积 $2.6\times10^{5}km^{2}$，草原鼠虫发生面积 $2.0\times10^{5}km^{2}$(肖德木　1993)。草地退化已是影响我国草地生态功能发挥、生产力提高的重要限制因素。科学家们认为，草地退化是草地生态系统在其演化过程中，其结构特征和能流与物质循环等功能过程的恶化，即草地生态系统的生产与生态功能衰退的现象。它既包括“草”的退化，也包括“地”的退化。它不仅反映在构成草地生态系统的非生物因素上，也反映在生产者、消费者、分解者三个生物组成上，因而草地退化是整个生态系统的退化，是指土地物理因子和生物因子的改变所导致的生产力、经济潜力、服务性能和健康状况的下降或丧失(张自和　2000)。

(二) 草地退化的动因

引起草地退化的原因有自然的，如长期干旱、风蚀、水蚀、沙尘暴、鼠、虫害等，也有人为因素如过牧、重刈、滥垦、樵采、开矿等。对导致草地退化的主导因素曾有过争议。有人认为气候变干是主导因素，但据气象资料分析，近百年来北方草原区气候尽管有波动，却未发生过重大变化，尤其是近 40 年来气候比较平稳，可见 20 世纪 60 年代以来全国范围的草原退化，气候并非决定因素，而主要是人为造成的(李博 1997b)。究其实质，是由于长期不合理、甚至掠夺式利用，从草地不断带走大量的物质，而得不到补偿，长期入不敷出，违背了生态系统中能量与物质流转平衡的基本原

则，因而导致了生态系统功能的紊乱、失调和衰退，使草地的生态与生产能力不断下降。如果这种衰退不断累积，超出了系统所能承受和恢复的阈限，最终导致草地生态系统完全丧失物质再生产能力，草地不复存在(图 5-15)。

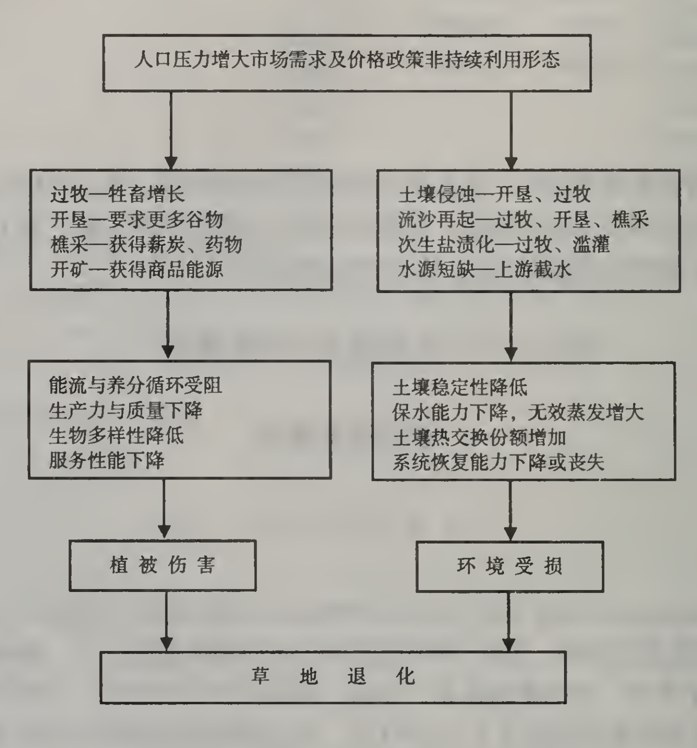


图 5-15　草地退化动因 (引自李博　1997a)

(三) 草地退化的类型和阶段

草地退化类型可按其所在区域、成因及表现等大致分以下几种：

荒漠型退化：主要发生在我国西北干旱风沙地区，是自然和人为造成的气候土壤旱化和植被破坏所致，是目前草地退化最主要的形式之一。荒漠化与草地退化互为因果，在干旱地区，草地长期无休止退化的结果就是荒漠化，直至变为沙漠。

盐渍型退化：与荒漠化密切相关的是土壤盐渍化，这类土地主要分布在西北内陆绿洲下游和边缘、河湖及滨海滩涂。目前我国受盐渍化危害的土地面积为 $4.4\times10^5\text{km}^2$，其中除 $5.78\times10^4\text{km}^2$ 的耕地外，其余绝大部分是因盐渍化而退化的草地。

黑土滩型退化：主要发生在我国青藏高原半湿润和湿润的高寒草甸类草地上，包括西藏、青海、川西北、甘南等地，主要是过牧、鼠类危害，再加干旱，使原有植被破坏后不能恢复，而变成裸露的黑土滩。据初步统计，在青藏高寒地区，黑土滩退化草地已达 $7.0\times10^4\text{km}^2$，其中在青海省境内 $3.33\times10^4\text{km}^2$，这类草地的进一步退化和干旱化，就会变为荒漠或石漠(唐维新　1999)。

毒杂草型退化：主要是在家畜过牧及鼠类等活动下，优良牧草被过度啃食而不能恢

复，原来以优质牧草为优势种的草地演变为以毒草为优势的植物群落，如北方草原上最常见的棘豆、醉马草、狼毒等，这类植物不但没有利用价值，家畜误食后还会中毒甚至死亡。

另外，还有水土流失型退化(黄土高原区)、鼠害型退化(青藏高原区)、石漠型退化(南方多石山区)等等。了解草地退化的主要类型，有助于人们更好地防治。

各种不同类型草地退化的相互影响、叠加和累积，使草地面临前所未有的困境。

草地退化一般分为三个阶段：① 草群变矮，盖度、产量下降，这时的草地如果给予适当的利用或休歇，可望 2 年内恢复。② 植被组成成分发生变化，劣质、低质杂草及毒草大量滋生，这时采取一定的管理措施尚可在较长时期内恢复。③ 生草土层完全破坏，这时无论是组成植物成分还是生境都发生了变化，想要恢复到原来植被极其困难，只能改良成其他草地类型。

(四) 草地退化指标及等级

草地退化范围很广，动因复杂，制定统一的指标体系有困难。从草地对家畜可利用性考虑，采用 5 个指标(张金屯　2001)。

1) 产草量。草地生态系统是一个太阳能固定与转化系统，太阳能利用率以及在系统内的转化效率是衡量系统状态的最重要的指标。在不同的草地生态系统中，太阳能利用率很不相同，产草量也差别很大。就山西高原的草地而言，其太阳能利用率为 1.3%~0.07%，产草量变化于 7.25×10^5~4.5×10^5kg/km^2，因此，衡量其是否退化应与各类型的原生状态比较。一般情况下，草群生产力随退化程度的增强而递减，但有时不可食的杂草或毒草会随退化程度递增，所以从生产力角度衡量，应以可食牧草产量为标准来评估退化程度，并与同一类型的原始状态比较。

2) 草地质量。草地质量在这里指的是营养成分与适口性的高低，一般可由种类组成来衡量。因为大部分草地植物的营养成分是已知的，在我国北方草地中，绝大部分优势种具有较高的营养价值与适口性，因此，在放牧利用下它们首先被采食，随着放牧强度的增加，优势种与适口性好的植物逐渐减少，而适口性差、营养价值较低的一些杂草则随放牧强度的增加而增加，甚至可代替原来的优势种。在此意义上，用现有群落的种类组成与顶极群落种类组成的距离来衡量草地退化程度是可行的。

3) 草地环境。在强度放牧影响下，草地覆盖度降低、土壤表层裸露、反射率增高、潜热交换份额降低，土表硬度与土壤容重明显增加、毛管持水量降低，风蚀与风积过程或水蚀过程增强，小环境变劣，进而土壤质地变粗、硬度加大、有机质减少、肥力下降，土壤向贫瘠化方向发展。

4) 草地结构。一个顶极草地生态系统，其结构是较为复杂的，食物链也比较长，从生产者到草食动物、第一级肉食动物、第二级肉食动物齐全，但在退化草地上，其食物链缩短、结构简化。

5) 草地恢复力。草地自我恢复能力是草地生态系统是否健康的重要标志。过牧影响下，自我恢复功能逐渐降低，直至完全丧失。

根据草地退化程度将其分为 5 级：弱度退化、轻度退化、中度退化、强度退化和极度退化。各级的主要特征表 5-10 所示。

表 5-10　草地退化分级及其划分标准

退化等级	植物种类组成	地上生物量与盖度	地被物与地表状况	土壤状况	系统结构	可恢复程度
I.弱度退化	原生种无变化，优势种和适口性好的种个体数量减少	下降<10%	覆盖良好	无变化	无变化	自然条件下可恢复
II.轻度退化	原生群落组成无重要变化，优势种个体数量减少，适口性好的种减少或消失	下降 20%~35%	地被物明显减少	无明显变化，硬度稍增加	无明显变化	围封后自然恢复较快
III.中度退化	建群种与优势种发生明显更替，但仍保留大部分原生物种	下降 35%~60%	地被物消失	土壤硬度增大 1 倍左右，地表有侵蚀痕迹，低湿地段土壤含水量、盐量增加	肉食动物减少，草食性啮齿类增加	围封后可自然恢复
IV.强度退化	原生种类大半消失，种类组成单纯化。低矮、耐践踏的杂草占优势	下降 60%~85%	地表裸露	硬度增加 2 倍上下，有机质明显降低，表土粗粒增加或明显盐碱化，出现碱斑	食物链明显缩短，系统结构简单化	自然恢复困难，需要改良措施
V.极度退化	植被消失或仅生长零星杂草	下降 85%以上	呈现裸地或盐碱斑	失去利用价值	系统解体	需重建

二、荒　漠　化

荒漠化(desertification)是威胁全球人类生存与社会发展的重大生态环境问题。据 1994 年在巴黎签署的《联合国关于在发生严重干旱和荒漠化的国家特别是非洲防治荒漠化的公约》的定义，“荒漠化是指包括气候变异和人类活动在内的种种因素造成的干旱、半干旱和干燥半湿润地区的土地退化……‘土地退化’是指由于使用土地和由于一种营力或数种营力结合致使干旱、半干旱和干燥半湿润地区耕地、草原、牧场和林地的生物或经济生产力和复杂性下降或丧失，其中包括：① 风蚀和水蚀致使土壤物质流失；② 土壤的物理、化学和生物特性或经济特性退化；③ 自然植被长期丧失”。“‘干旱、半干旱和干燥半湿润地区’是指年降水量与潜在蒸发之比在 0.05~0.65 之间的地区……”。荒漠化的类型包括风蚀沙化、水土流失、盐渍化和冻融荒漠化，其表现则是土地生产力的退化(赵雪　2000)。

根据中国防治荒漠化研究与发展中心公布的普查与统计结果(卢琦　1998)，目前全国荒漠化总面积 2.622×10^6km^2，占可能发生荒漠化地区总面积的 80%，占国土总面积 27.3%。其中风蚀荒漠化 1.607×10^6km^2，占荒漠化总面积 61.3%；水蚀荒漠化 2.046×10^5km^2，占 7.8%；冻融荒漠化 3.633×10^5km^2，占 13.8%；土壤盐渍化 2.332×10^5km^2，占 8.9%；其他荒漠化 2.138×10^5km^2，占 8.2%。目前仍以每年 2.46×10^3km^2 的速度扩展。

荒漠化的成因也可分为自然因素和人为因素，其中人为因素是最主要的，其表现形式是超过生态系统自我恢复能力的滥牧、滥垦、滥伐及其他环境破坏活动，其中放牧直接针对草地植被，滥垦也以草地为首选的土地类型，滥伐中的过度采挖野生药材等破坏性活动也大都发生在草原上。与乔、灌木植被相比，草本植被地上部分空间结构简单，冷季枯萎衰亡，地下根系较浅，遭受破坏发生退化后，抗风蚀和水蚀能力更弱，出现风蚀水蚀破口并迅速扩展。而风蚀和水蚀在荒漠化自然营力中分布最广、作用最强，因此，草地生态系统是最易因管理和利用不当而产生荒漠化、最易受危害的生态系统(陈怀顺　2000)。

三、草地退化与荒漠化的防治

同荒漠化的发展过程一样，荒漠化的逆转过程也必须是主要依靠人为干预促使植被和土地生产力恢复的过程。荒漠化土地的治理要因地制宜，综合治理。如干旱地带沙质荒漠过程的绿洲要以建立以绿洲为中心的防护体系；在半干旱农牧交错区要将调整土地利用结构与防护措施相结合；在水蚀作用下的荒漠化土地上游以防为主，中游防治结合，下游以治为主，在各种措施中，都要对草本植物给予足够重视。具体来说，对于风蚀引起的，即沙漠化防治包括沙丘固定、防止土壤风蚀和绿化以增加植被等三部分，以生物工程措施为主，以保持和人工扩大林草植被为中心，建立防、治、用有机结合的治沙工程体系；对于由水蚀造成的水土流失也应以生物措施为主，采取生物措施与工程措施相结合的综合防治；对于物理化学营力引起的土地盐渍化，应采取：① 明沟排水、竖井排水以降低其地下水位；② 淡化地下潜水；③ 采用平整田面、减少田面的不平衡的蒸发积盐面，同时采取农业措施培肥土地，增加农田植被的覆盖。

草地生态建设是防治荒漠化的主要措施，理由是：① 草地退化是荒漠化的主要表现形式，对大面积的荒漠化土地来讲，恢复到较好的草地植被最适宜于当地的自然环境；② 适于荒漠化区域生长的草本植物多样性远大于乔灌木，选择性多且需水量少，进行草地生态工程建设单位面积投入少，收效快；③ 我国大部分荒漠化地区为贫困区，人口增长快，生存压力巨大，为使公众具有参与的积极性和自觉性，治理荒漠化的生态环境建设必须考虑生态效益与经济效益、长远利益与近期利益相结合。在荒漠化区新开发种植业虽效益高但受水土资源严重制约，保护性的林业缺少近期直接效益，因而草业生态建设是上述两个结合的最佳连结点。

国家以生态环境建设为重点的西部大开发战略决策为加快荒漠化防治提供了极好的机遇和条件。在 21 世纪，一方面经济、科技将迅速发展，文化、教育将进一步普及，政府和国际社会在环境保护上采取行动的能力提高，有可能使中央和各级政府加大对荒漠化防治和生态环境建设的投入力度，加快荒漠化逆转的速度；另一方面，人口及其需求的持续膨胀，将会使其与资源和环境之间的矛盾更趋突出，易发生荒漠化的地区与其他区域之间的贫富差距可能继续拉大，也可能导致一部分人更加紧对自然资源的掠夺性经营和对环境的破坏，使荒漠化继续扩展。因此，荒漠化防治必须以可持续发展原则为指导，注重生态环境建设与经济开发的结合，所以，应做到：

1) 抗荒漠化草本植物种类选育。在荒漠化发展严重的流动-半流动沙地、盐渍化土

地和高寒冻融土地中，都有一定数量的草本植物种类对这些极端生境有独特的适应性和抗性，是有重要价值的基因资源，应对其适应和抗极端生境的机理进行深入研究，在此基础上选育既具有优良经济特性又能较好抗御荒漠化危害的草种，及寻找更有效的种植、管理和利用技术，使其能尽快成规模地应用于治理荒漠化的草地生态建设中。同时还应注重选育适于林地、灌丛下层的优良草种，以实现林、草协调发展。

2) 草地改良。是对天然草地采取一定的技术措施，调节和改善草地生态环境中土、水、肥、气、热和植被等自然因素，促进牧草生长，提高草地生产力的一种方法。主要办法有封育、封育+补播、补播、浅耕翻、浅耕翻+补播、轻重耙松土、草地灌溉和草地施肥等。草地补播能使牧草种类丰富，增加草层覆盖度，改善牧草品质，增加产量，是更新复壮草地植被的重要措施(全国生态农业县建设领导小组办公室　1996)。浅耕翻改良技术适用于退化的以根茎型禾草为主的草甸草原、典型草原(赵景峰等　2000)。封育草场是给草场以休养生息的机会，使其积累足够的营养物质，繁殖结籽，逐渐恢复草地生产力，有利于牧草自然更新，大面积提高产量。

3) 飞播牧草。是一项现代化的草原建设，它既可改良退化、沙化草场，又可在沙区建立高产的人工草地，飞播牧草的成功和推广，是草原建设上的一大突破。飞播牧草投资少，见效快，效益高，是改造沙漠、建设草原的绿色之路。飞播后的草地，不仅生态条件得到明显改善，草原退化得到治理，沙漠及沙区变成绿洲，而且播区也成为固定的打草场和草种基地，对于流动沙地沙丘的基本固定或半固定起重要作用。

4) 治理恢复退化草地，建设人工草地。由于草地退化面积大，只靠天然草地养畜已走到尽头，牲畜头数已超过了天然草地的承载力，只有增草才能增畜。因此，大力进行草地改良和人工草地建设，是缓解草场压力的最重要措施，为此，应建设围栏(草库伦)，把草地用篱障栏围起来，进行有目的的建设和有计划的利用。近几十年来世界上许多国家人工草地所占比例日益提高，如荷兰 80%，新西兰 60%，英国 56%。我国牧区人工草地也有所发展，东北地区正在发展羊草人工种植，西北地区发展披碱草属牧草的种植，其他地区对苜蓿属、草木樨属、无芒雀麦等的种植都取得较好成效。

5) 加强对草地旅游等非农业开发的科学管理。草地旅游，是任继周提出的“前植物生产层”理论目前在我国的主要实践，已逐步形成热潮，并对一些无工业资源的草原区经济起到了一定的带动作用。但草原区生态环境的脆弱性决定了其对旅游等人为活动的承受能力有限，草地旅游的无序发展会对当地的生态环境产生不良影响，甚至引起新的荒漠化过程(赵雪　1994)。因此，在草地旅游和工矿业等草地非农业开发中，必须对其资源潜力、环境容量和潜在的生态环境负面影响给予科学的预测和评价，提出符合可持续发展原则的解决方案和管理措施。

6) 以法管理草地。坚决贯彻《草原法》，制止滥垦、滥伐、滥采、过牧等非持续利用形式。要合理规划，实行轮牧，并严格以草定畜，不允许超载放牧。在山区、面积较大的连片草地，可以建成国家公园或自然草地保护区，以保护草地生物多样性，满足生态旅游、草地科研等需要(郑凤英等　1996)。

7) 加强科学研究和人才培养。大退化草地和荒漠化治理中，许多理论有待完善，需要加深对草地退化机制的认识，为草地科学管理提供依据。在草地治理、恢复及科研中，需要大量的技术人员、管理人员，应加快培养。

第八节　草地灾害及保护

我国的草地所处的自然条件较为严酷，夏季少雨，冬季严寒，是自然灾害频繁发生的地区。近年来，草地自然灾害频繁发生且某些灾害有愈演愈烈之势，这不仅给草地产业造成极大危害，久而久之将酿成巨大的生态灾难。减轻自然灾害造成的损失和从根本上防止自然灾害，对于我国草地来说已刻不容缓。

一、草 地 灾 害

(一) 草 地 雪 灾

草地雪灾在牧区称之为“白灾”。主要发生在我国内蒙古、新疆、青海、西藏等省区及甘肃、四川的部分地区。在雪灾易发区有两个高发中心：其一位于大兴安岭以西至贺兰山以东、阴山和燕山以北与呼伦贝尔盟以南的区域内，中心在内蒙古锡林郭勒盟；另一在青藏高原东北部，即长江、黄河上游至青海湖和祁连山东段、唐古拉山东段至唐古拉山西段， 中心位于西藏那曲地区。草地雪灾来势迅猛，覆盖面积大，灾情持续时间长，往往给当地畜牧业生产和牧民的生命财产带来沉重的损失。雪害来临后 2~3 天便暴发成灾。积雪覆盖面积可达数十万公顷，有时表层结成冰壳，数月不融，道路封堵，交通中断，救灾人员和物资不能及时到达灾区，救灾工作难以实施。新中国成立以来，北方牧区发生大雪灾近 70 次，直接经济损失达百亿元。草地雪灾发生频繁，危害面积大，已成为草地畜牧业发展的制约因素(周禾　1999)。

(二) 草 地 火 灾

我国是世界上发生草地火灾比较严重的国家，在 392 万 km^2 的草地中易发生火灾的占 1/3，频繁发生火灾的占 1/6。我国草地火灾发生最频繁区域在内蒙古草原区，其中，锡盟东乌珠穆沁旗、呼盟陈巴尔虎旗和新巴尔虎旗为草地火灾的高发区。火灾发生时段为 3~6 月份和 11~12 月份。

在 1949 年以来的近 50 年中，我国牧区共发生火灾 5 万多次，受害面积 $2.0\times10^6km^2$，在火灾中烧死 423 人，烧伤 1500 人，造成经济损失约 600 多亿元。1987 年后，我国加强了草地防火工作，通过增加资金投人，加强法规和机构建设，提高防扑灭装备水平和科技水平、推广配套的防扑灭技术，取得了很好的效果。

近年来，由于起火原因增多，火源管理难度大，境外火源频频过境，给草地防火工作带来很大难度。每年草地火灾受害面积仍是森林火灾受害面积的几倍至几十倍，而且大部分重、特大森林火灾是由于草地火灾蔓延所引起的。以防为主，实时监测，及时扑灭，减轻损失，是防止草地火灾的工作重点。

（三）沙　尘　暴

作为自然灾害的沙尘暴(sandstorm)，主要发生在干旱地区。沙尘暴是由于大气环流、干旱气候、草地裸露而由大风扬起的大片沙粒。20 世纪 90 年代以来，沙尘暴相继发生，沙尘暴的频频发生与当地人类大范围的破坏和草原地区生态环境恶化密切相关，恢复草原植被、改善生态环境是防止沙尘暴的根本措施。

（四）草 地 鼠 害

草地是鼠类的栖息地，草地退化与鼠害互为因果，相互作用，使鼠害的危害程度日益加重。近年来，我国草地鼠害发生的面积近 $3.4\times10^7km^2$，每年损失牧草达数百亿公斤。青藏高原鼠害发生面积为 $1.2\times10^6km^2$，约占该区草地总面积的 13.6%。据调查估计，一只布氏田鼠每日吃干草 14.5g，全年消耗牧草 5.29kg。一只高原鼠兔每日采食鲜草 73.3g，在牧草生长季节的 4 个月内，共消耗牧草 9.5kg(甘肃农业大学　1999)。

各种鼠类的破坏主要有：① 挖掘活动损失牧草。春季牧草返青前后，鼠类挖掘活动较频繁。挖洞时把大量下层土壤推到地面，在洞口前形成土丘。在土丘覆压下，一些顶土力弱的优良牧草黄化而死亡，而许多顶土力强的根茎、根蘖性的植物能破土生长。土丘覆压优良牧草，为杂草滋生创造了条件，降低了草群生产力。② 挖洞成丘影响土壤肥力。土壤肥力最丰富的层次是 A 层表层土和 B 层心层土上部，是草原植物的养料源泉。鼠类在这一沃土层挖洞，把肥沃土壤翻到地面，形成土丘。在干旱多风季节，这些疏松土丘，往往因风蚀而夷平，导致土壤肥力的大量损失。据调查，青海省贵南县木格滩的鼢鼠土丘，由于风蚀作用，每公顷损失腐殖质 2553kg，氮素 130.5kg。严重影响牧草的生长。③ 植被盖度降低，促使土壤水分蒸发。由于鼠类挖掘活动，形成土丘、鼠坑等次生裸地，在杂草尚未定居的情况下，这些疏松的次生裸地的土壤水分极易蒸发。④ 改变植被成分，引起群落演替。如在天峻县阳康地区，由于高原鼠兔的活动，使原生植被中多度百分率为 100%的小嵩草(*Kobresia pygmaea*)，在轻度危害区减少到 53%，在中度和重度危害区依次减到 35%和 11%。到极度危害区则全部消失，而适口性差的植物或有毒植物，则得以保存并大量滋生。

二、草地减灾对策

1) 建设抗灾基地，提高抗灾能力。针对草地自然灾害频发区自然条件恶劣，基础设施和生产条件差的弱点，加强草地基础设施建设，重点解决围栏、人工草地、定居点棚栏及饲养草料加工贮藏等综合配套设施，改变靠天养畜的被动局面，提高自身抗灾能力。同时，在灾害高发区建立救灾物资储存库，以便在灾害发生时实现快速救灾，减少损失。

2) 加强科学研究，增加投资力度。要加深对草地退化机制的认识，以控制生物、非生物因素对草地退化的影响，为持续合理利用草地提供依据。通过减灾科学研究与实践，逐步完善科学体系与技术措施，从而实现科技减灾。实施建设工程，动员社会各方

面的力量，争取多渠道投资，以政府投资为主，同时鼓励社会和引导牧民投资。实施牧区草地改良与建设工程，在适宜改良的地区进行围封和补播，这是提高草地生产能力、缓解草地压力的重要措施。对草地退化严重又在生态环境和草地畜牧业生产中具有重要地位的地区，要实行生态再造工程的建设。

3）建立监测体系，减轻灾害损失。对草地自然灾害实施监测可及时发现灾情，迅速实施救助，这是减轻灾害损失的有效手段。充分利用卫星遥感技术和地理信息系统，建立草地自然灾害监测预报系统，增加科技投入，使灾害监测预报更加及时准确。

第六章　工业生态学与清洁生产

第一节　工业生态学

工业生态学并非全新的概念，20 世纪 60 年代的科技文献中已经时而出现这一个词了，但是没有更为深入的研究。1989 年 Frosch 和 Gallopoulos 在《科学美国人》上一篇题为“制造的策略”的文章中重新提出工业生态学这一概念。从此以后，工业生态学走上了充满活力的发展之路。工业生态学是针对工业化及其对自然系统的影响，通过运用生物系统原理和生态系统的结构、功能的基本模式形成了现代工业的管理思想和综合管理工具。可以毫不夸张地说，目前，工业生态学正在成长为一个由工程学、生态学和生物经济学交叉构成的科学与技术的崭新领域。

一、工业生态学的产生背景

自 18 世纪以来，工业革命开创了机器大生产的新时代，因现代工业机器的出现，使世界面貌发生了根本的变化，为人类创造和发展了以巨大物质财富为主要特征的现代文明。然而，伴随着此过程，也出现了资源短缺、能源危机、环境污染和生态破坏等一系列全球性的严重危机。危机告诉人们，传统工业发展模式已难以为继，迫使人们对工业发展历程中传统的高投入、高能耗、高污染的工业发展模式进行深刻的反思。然而，在现实的选择中，人们并不希望限制或放弃工业化成果来谋求危机的解除。事实上，全球日增的人口及其对物质资源需求的刚性增长说明，这种想法也是行不通的。因此人们所希望的是，在创造和享受工业文明的同时，最大限度地减轻它的负面影响，从而达到持久实现福利增长和人与自然和谐相处。在这种思想指导下，经济学家和工业界对工业的发展模式进行了大量的探索。当时称为工业共生现象，这就是生态工业的雏形。

1989 年，Frosch 和 Gallopoulos 在《科学美国人》发表的一篇文章中，正式提出“工业生态学”和“工业生态系统”的概念，这一创造性的提法引起了广泛关注。1993 年，受到卡伦堡的启发，美国商人 Hawken 在《商业生态学》一书中，也提出工业生态系统和生态工业园的问题。1994 年，加拿大新斯科舍省达尔湖西大学的一个研究小组明确提出了生态工业园区的设想。在所有提法中最有代表性的是，联合国工业发展组织 1991 年 10 月提出的生态可持续工业发展”(ecological sustainable industrial development)”的概念，认为工业生态是一种对环境无害或生态系统可以长期承受的工业发展模式，是一种环境与发展兼顾的模式，并成为全球可持续发展在工业方面的具体体现。这是现代工业发展历史性的重大转折，这一概念的提出，标志着未来工业的主导发展方向，由传

统工业发展模式转向生态工业的可持续发展模式，不少专家预言，生态工业将成为 21 世纪全球工业发展的主旋律。尽管工业生态学还十分稚嫩，但已经表现出了某种成熟的形态，标志之一是 1997 年春季美国麻省理工学院出版了《工业生态学》杂志，这是世界上第一本专门介绍这一正在发展中的新兴学科的学术刊物。

二、工业生态学的内涵和意义

我们习惯上认为工业体系是与生物圈相对立的，工厂和大自然的存在形式和空间分布是相互隔离的。带着这种局限性的观念，就不可避免地忽视了工业体系对“外界”、对其周围世界、对“环境”的影响。环境保护主义者们，以及他们的先驱者们，长期以来，关注的是工业活动造成的不良后果，即污染对生态系统造成的破坏；但工业体系的运行机制本身始终在他们的研究范围之外。工业生态学理论和实践拓宽了我们的观念，认识到工业体系是生态体系的一种特殊式样，如同生物生态系统一样具备物质、能量及信息的流动、储存功能。而且，工业体系总起来说是建筑在为之提供物质、资源与服务的生物圈基础上的人为色彩较为浓厚的生态系统。因此，工业生态系统与生物圈之间存在着广泛的多少有些直接的相互影响。生态工业是按经济生态原理和知识经济规律组织起来的基于生态系统承载能力、具有高效的经济过程及和谐的生态功能的网络型、进化型产业。与传统工业不同(表 6-1)，生态工业通过两个或两个以上的生产体系或环节之间的系统耦合，使物质、能量能多级利用、高效产出，资源、环境能系统开发、持续利用，工业发展的多样性与优势度，开放度与自由度，力度与柔度，速度与稳度达到有机结合，污染负效益变为经济正效益。“在传统的工业体系中，每一道制造工序都独立于其他工序，消耗原料，产出将销售的产品和将堆积起来的废料；我们完全可以运用一种更为一体化的生产方式来代替这种过于简单化的传统生产方式，那就是工业生态系统。

表 6-1 生态工业不同于传统工业的特征

类别	特征
横向耦合	不同工艺流程间的横向耦合及资源共享，变污染负效益为资源正效益
纵向耦合	从源到汇再到源的纵向耦合，集生产、流通、消费、回收、环境保护及能力建设为一体，第一、二、三产业在企业内部形成完备的功能组合
区域耦合	厂内生产区与厂外相关的自然及人工环境构成产业生态系统或复合生态体，逐步实现有害污染物在系统内的全回收和向系统外的零排放
功能导向	以企业对社会的服务功能而不是以产品或利润为经营目标，谋求工艺流程和产品的多样化
柔性结构	灵活多样、面向功能的结构与体制，可随时根据环境的随机波动调整产品、产业结构及工艺流程
软硬结合	配套的硬件、软件和心件研究与开发体系，配合默契的决策管理、工程技术和营销开发人员
自我调节	以生态控制论为基础，能自我调节的决策管理机制、进化策略和完善的风险防范对策
增加就业	合理安排和充分利用劳动力资源，增加而不是减少就业机会
人类生态	工人一专多能，是产业过程自觉的设计者和调控者而不是机器的奴隶
网络经济	内外信息及技术网络的畅通性、灵敏性、前沿性和高覆盖度

一个工业生态系统，完全可以像一个生物生态系统那样循环运行：植物吸取养分，

合成枝叶，供食草动物享用，食草动物本身又为食肉动物所捕食，而它们的排泄物和尸体又成为其他生物的食物。当然，也许人们永远也达不到一个完美的工业生态体系的境界，但是，企业家与消费者完全可以改变他们的习惯，如果他们愿意保持或提高生活水准而又不去破坏环境的话。努力控制工业生产所需的原材料和废物流，把生产过程中产生的副产品变成下一个生产过程的原材料再利用，以达到消灭污染的目的，即废物资源化。工业生态的概念不只是工业过程的定点和相互作用的互补，同时在调整工业企业内部的新陈代谢、实现能量输入和废物输出的最小化的问题上，更加强调工业生产与环境的承载能力相适应的原则。从这一原则出发，工业设计必须注重“非物质化”，单位产出的能耗和物耗应减少，工业工艺使用的原材料达到最小，实现工业生产过程的非碳化——从以碳为基础燃料的传统工业向以氢气为燃料的现代生态工业转化。

福罗什和加劳布劳斯的文章发表以后，引起了学术界的广泛探索和讨论，许多学者发表了他们各自的看法，关于工业生态学的定义不存在标准的定义。据加拿大达尔荷西亚大学(Dalhousie University)Cote 的统计，有关工业生态学的不同定义达 20 种之多。不管这些定义有多么不同，但学者们在关于工业生态学的三大基本要素方面是认同的：第一，工业生态学是一种关于工业体系的所有组成部分及其同生物圈的关系问题的全面的、一体化的分析视角；第二，工业体系的生物物理基础，亦即与人类活动相关的物质和能量流动与储存的总体，是工业生态学研究的范围，与目前常见的学说不同，工业生态学的观点主要运用非物质化的价值单位来考察经济；第三，科技的动力，亦即关键技术种类的长期发展进化，是工业体系的一个决定性(但不是惟一的)因素，有利于从生物系统的循环中获得知识，把现有的工业体系转换为可持续发展的体系。如同福罗什 1990 年在英国工程师协会的报告会上所指出的那样，工业生态学是一个不应完全按照字面意思来理解的概念，“工业生态系统的概念与生物生态系统概念之间的类比不一定完美无缺，但如果工业体系模仿生物界的运行规则，人类将受益无穷”。

工业生态学可以概括为是研究工业体系中减少原料消耗、改进生产程序、缓和对环境的影响和废物资源化综合性的应用生态学分支学科，是一门理论与方法高度统一的实践性学科。因此，工业生态学应被看做是对所有工业和经济实体及它们与自然系统的基本联系(物理、化学和生态的联系)进行多学科客观研究，涉及原料生产和能源生产及其使用、新材料、基础学科、经济学科、法律、管理、人类学和人文科学等，将工业生态学称之为“可持续性科学”，应用于指导人们理智地进行工业生产实践，通过提高能力，增进技能，促进理解，使工业的经济性与生态环境可持续性冲突不断减少，逐步走向和谐。

三、生态工业的理论与实践

生态工业是按生态经济管理和知识经济规律组织起来的基于生态系统承载能力、具有高效的经济过程及和谐的生态功能的网络型进化型产业。它通过两个或两个以上的生产体系或环节之间的系统耦合使物质和能量多级利用、高效产出并持续利用。生态工业的组合、孵化及设计原则主要有 10 点，即横向耦合、纵向闭合、区域整合、柔性结构、功能导向、软硬结合、自我调节、增加就业、人类生态和信息网络。

20 多年来工业生态的理论发展，指出可持续工业必须实现从末端治理的被动环保主义向物质能量循环一体化的工业体系转变。这种工业体系“完全可以像一个生物生态系统”那样循环运行：植物吸取养分，合成枝叶，供食草动物食用，食草动物本身又为食肉动物所捕食，而他们的排泄物和尸体又成为其他生物的食物。

生态工业在价值观上对传统经济理论提出了挑战，这一理念付诸实践将对社会产生深刻影响。从表面上看，至少有两点非常明显。首先是对发达国家社会生活方式的影响。在提交罗马俱乐部的一份新报告 *Factor Four* 中，可以看到生态工业将影响到人们衣食住行的各个方面，而重要的是，所有这些改变都有现成的技术作为保证。该书的作者不遗余力地对所有的技术和方法进行改进，做出价格成本分析和生态成本分析，力图告诉读者，采用新技术、新方法使生活方式更加符合生态可持续性要求，不但没有额外的成本负担，反而有利可图。这种在维持消费效用至少不降低的基础上谋求生态可持续发展的立场，显然比依靠单纯说教让已经习惯于舒适生活的人们采用降低生活标准的方法节约物质能量消耗，要有魅力得多。其次是对生产组织形式的改变。这一点主要体现在生态工业园区的建设和日渐风靡上。事实上工业生态学本身的发展是与生态工业园区的自发性实践过程密不可分的。其中有关工业生态系统的一个经典案例——卡伦堡工业共生体系是从 20 世纪 50 年代以来逐渐自发形成的，到 80 年代以后才开始为世人所关注。在这个人口不足 2 万的丹麦小城，几家工厂通过互相连接的管道，实现废物和热能的循环利用，从而减少了本地工业对环境的干扰，提高了资源利用效率。随着可持续发展引起世人关注，生态工业园区的价值开始受到重视。近年来，许多国家纷纷规划筹建自己的生态工业园区。目前美国已有 16 个生态工业园区项目，包括以沿海工业为特色的弗吉尼亚的查尔生态工业园区。

斯港工业区是一个以老工业区改造为特色的生态工业区，有两部分组成，它们是专门从事工业废物交易的得克萨斯的布朗斯维尔市场和以各种绿色产品和环保技术为主的产业园区。同时还有相当数量的工业区在规划建设中部分借鉴了生态工业的思想。欧洲、日本在生态工业园区建设方面也各具特色。各种专门从事生态工业研究的机构应运而生，比如国际联系与发展研究会、美国可持续发展总统委员会(President's council on sustainable development，PCSD)等。许多大学还开办了相应的课程，研究推广相关技术的思想。

经过 20 多年的发展，工业生态学的理论和实践内容正在丰富和日臻完善，工业生态学的思想主要体现在以下方面。

1) 闭路循环。生态工业是模拟生态系统而建立的生产工艺体系，在生产过程中，物质和能量在各个生产企业和环节之间进行循环、多级利用，减少资源浪费，做到污染零排放。据此理念，全球现已建立了许多生态工业园区。

2) “废料”的资源化。充分利用每一个生产环节的废料，把它作为下一个生产环节的或另一部门的原料，以实现物质的循环使用和再利用。

3) 污染零排放。从技术经济的角度考虑废弃物回收利用的产品设计，减少和防止消耗性污染，消除污染物的扩散。所谓消耗性污染是指产品在消耗或消费过程中必然产生污染物质，比如矿物燃料的消耗产生的污染。这就要求改良原料，采取能够预防和防止各种消耗性废物排放的原材料，替代或禁用有毒材料。

4）产品与服务的非物质化。产品与服务的非物质化是指用同样的物质或更少的物质获得更多的产品与服务，提高资源的利用率。这要求依据功能设计产品，努力做到在生产、使用、维护、修理、回收和最终弃置的过程中减少物质和能量的消耗。

5）能源脱碳。含碳矿物能源利用会产生温室效应、烟雾、酸雨、赤潮等环境问题，解决方法就是减少利用含碳较多的能源物质，采用非矿物燃料。比如用天然气替代煤炭，利用水能、太阳能清洁能源等，减少对环境的不利影响。

四、生态工业的类型与特征

（一）生态工业的类型

生态工业是一种先进的现代工业生产形式，它的核心作用是能够充分合理利用自然资源。由于利用自然资源的具体形式不同，因而也就形成了不同的生态工业类型。

1. 资源节约型生态工业

资源节约型生态工业着眼于资源的有限性，本着节约资源的原则进行工业生产。自然资源包括可再生资源和不可再生资源，前者的有限性是相对的，后者的有限性是绝对的。自然资源的有限性表现在：它在特定条件下的数量是有限的，它的再生能力是有限的，因而它最终能供给人类消费的数量也是有限的。随着人口的急剧增加和资源的大量消耗，资源衰退趋势日渐明显。这就要求人们要改变以往的资源消费观念，珍惜、节约和合理利用资源，发展资源节约型生态工业体系。

2. 资源开发型生态工业

资源开发型生态工业着眼于资源的多样性与空间分布的广泛性。自然资源种类的多样性和地区分布的普遍性和差异性，为人们充分利用资源，广泛发展生态工业提供了有利条件。立足于资源的多样性，适度开发各种类型的资源，建立资源开发型生态工业体系。

3. 资源综合利用型生态工业

资源综合利用型生态工业着眼于资源的共生性。自然资源在生态系统中多是以化合物或混合物的形态存在的。它的存在有的是以单项为主，有的是多相综合。以单项为主的资源，比如某种矿产资源，其存在形式也多是共生的，即在一种主矿中，存在着其他一些有价值的共生或伴生矿物成分。它们可在生产过程中，经过一定的冶炼和分离技术，同时将它们提炼出来，成为社会财富。资源的共生性特点要求人们在发展生态工业时要重视资源的综合利用，即在利用资源生产一种主产品时，同时要充分利用生产过程中的剩余资源，生产其他多种副产品。其立足点是资源利用的“深化”，即实现原材料的多级利用，减少资源浪费，降低污染物排放，建立资源综合利用型生态工业体系。

4. 资源替代型生态工业

资源替代型生态工业着眼于资源的多用性或多宜性，即一种资源可以有多种用途。比如可以作为生产某种产品的原料，同时也可以作为生产其他产品的原料，特别是在现代科学技术迅猛发展的条件下，资源的利用途径越来越广泛。资源的多用性特点要求人们在发展生态工业时重视资源的替代作用。这是资源利用的“功能拓展”。建立资源替代型生态工业体系，实现资源最佳利用。

5. 绿色能源工业

1) 清洁煤炭工业。利用清洁生产技术，进行煤炭生产，主要包括煤炭洗选、加工(型煤、水煤浆)、转化(煤炭气化、液化、发电)等过程，旨在减少污染排放与提高煤炭综合利用效率。

2) 新型能源工业。随着人们对环境和资源保护意识的提高，开发利用新能源和可再生能源的步伐加快，未来能源结构将发生较大的改变。能源的开发利用从资源型向技术型、从粗放型向集约型转化，优质、高效、洁净的能源在本世纪会得到长足的发展。目前，发展较快的清洁能源有水能、地热能、风能等。随着一些关键技术的突破，太阳能、天然气、生物质能、氢能、核聚变能等清洁、无污染的新能源必将得到更广泛的应用。

6. 有机食品工业

有机食品是指在生产和加工过程中，不施化肥、农药，没有人工防腐剂、保鲜、色素、香精等添加剂，无污染、无农药残留的天然食品。因此，有机食品实际上是一种无污染的、安全的、优质纯天然食品，相当于我国的 AA 级绿色食品。

发展有机食品工业，必须以高标准的生态农业或可持续农业为基础，其产品原料产地的土质、水质、大气等都必须符合有机食品生态环境标准，农作物种植、禽畜和水产养殖过程中不施化肥、农药、激素、杀虫剂、调节剂，而用有机肥料、生物农药、微量元素，加工过程不使用人工防腐剂、保鲜和色素等添加剂，产品上的农药残留、有害重金属、有害细菌的检测必须符合有机食品的质量和卫生标准。有机食品的生产基地以远离大城市和工矿区为佳，特别是它的原料生产基地，以地广林密人稀的山区为佳，因此发展有机食品工业将为工业欠发达、污染轻、植被覆盖率高、自然生态环境保护好的区域经济发展带来新的机遇。

20 世纪 60 年代后，一些发达国家率先进行了生态农业实验，由于安全、优质、营养的有机食品迎合了人们的消费意愿，得到了越来越多消费者的青睐。70 年代以来各种有机食品纷纷问世，1992 年我国成立了绿色食品开发中心，1993 年被接纳为有机农业国际联盟正式会员，我国政府已将开发绿色食品列入 21 世纪议程，从而极大地推动了有机食品工业的发展。目前，以天然饮料(矿泉水、纯净水、果汁等)生产、绿色小杂粮加工、无污染的肉蛋奶加工、清洁蔬菜生产、保健食品生产等为主的有机食品工业发展迅速， 市场潜力巨大，发展前景广阔。据专家估测，全球有机食品的销售量将以每年 10%~20%的速度增加，今后 10 年内有不少国家和地区的有机食品的年销售量增长将

达到30%甚至50%，世界市场潜力在1000亿美元以上。有机食品将成为21世纪的食品发展方向。

（二）生态工业生产的特征

1. 具有当代生产力的高水平

生态工业生产力的高水平表现在两方面。一是它继承和发扬已有的先进工业生产力。二是它采用当代各种新的“绿色技术”，即有效利用资源又无污染的高新技术，有利于工业经济的可持续发展。

2. 建立在经济与生态协调的基础上

人们应以经济生态学的原理为指导，以经济的可持续发展为目标，自觉地和有意识地组建工业经济生态系统，发展工业生产。力求使工业生产既能够充分合理的利用自然资源，避免对资源的过度消耗与浪费；同时又可避免产生大量的“三废”污染，避免对生态环境的破坏。可见，生态工业是经济与生态高度协调的现代工业发展形式。

3. 倡导技术创新与采用生态工艺

生态工业生产从经济生态学的角度出发，采用先进的清洁生产技术，通过淘汰高耗能、高污染、低效率的老工艺，建立低能耗、无污染、高效率的新生态工艺，综合利用资源，实行原材料的闭路循环和多级利用。并且，生态工业对其产品的设计、制造与销售的全过程实行生态化经营管理。

五、生态工业的管理

生态工业是以经济生态学理论为指导，通过管理工业企业的生产活动和组织活动， 使工业企业的生产和组织活动按照经济与生态协调发展的轨道运行，以获得最大的经济效益与生态效益，避免造成经济损失和生态破坏。生态工业管理包括生态工业企业的生产管理和组织管理两方面。其中，前者主要是指生态工业企业的技术创新，后者主要是指其制度创新。生态工业企业在制度创新方面应注意以下三点。

（一）实行生态环境补偿制度

为减少、制止和从根本上解决工业企业所造成的资源浪费和环境污染问题，生态工业应建立现代企业制度，实行生态企业内部的生态环境补偿制度，使企业的“外部不经济性内部化”，以实现生态工业企业的生态效益、经济效益和社会效益的统一。

（二）建立生态成本和经济成本核算制度

目前我国企业的成本核算，采用的是经济成本，只核算经济过程中的活劳动和物化劳动的耗费，而把反映生态环境资源消耗的客观存在的生态成本排除在企业的成本-效益核算之外。这不仅不能如实反映工业企业的实际耗费情况，而且也使所消耗的生态环境资源得不到补偿。长期积累就会形成巨大的生态环境资源“赤字”，使经济与生态难以可持续发展。生态成本是恢复和再生生态环境资源所用的劳动耗费及其补偿。经济成本和生态成本都是人类劳动的耗费，并且共同构成经济生态成本。在工业生产过程中，经济成本、生态成本和经济生态成本都是客观存在的。生态工业企业建立现代企业制度，应将生态成本和经济生态成本的核算制度建立起来，使工业企业所形成的外部不经济性内部化，使所消耗的生态环境资源能够再生，从而使整个社会的可持续发展成为可能。

（三）建立生态经理制

生态工业企业建立现代企业制度，实行各种经济生态管理措施，都需要人的组织实施来落实。在这一方面我们可借鉴发达国家生态经理制的经验，比如美国杜邦公司任命主管环境事物的生态经理，体现了生态企业的制度创新，对促进企业经济与生态的可持续发展具有重要意义。

六、生态工业园区的建设

我们知道过去几十年中，经济活动全球化加剧了新旧产业空间的兴衰更迭及彼此之间的激烈竞争。在现代信息技术和交通技术的帮助下，跨国公司控制的生产链把位于世界各地的产业区连成全球生产网络，国际贸易已经从最终产品交易向不同阶段产品的空间流动(既包括物质流动，也包括信息流动)转变，生产活动的区位选择自由度大大增加了。发展中国家的低成本优势在这种长脚的工业面前具有较强的竞争力。但是基于生态工业革命的生产组织形式变革，将打击发展中国家利用低成本优势模仿发达国家传统工业区的努力。生态工业园区的发展目标就是要尽可能实现本地生产过程中的物质能量循环，通过本地生产生活系统的有机结合，减少系统内外的物质能量交换。也就是说，这种发展模式最终会使产业区从物质产品输出为主，转向技术、服务等非物质形态产品输出为主。而目前发展中国家和地区的传统工业区大多依靠向发达国家市场大规模输出产品来维持高速增长。刚刚无果而终的西雅图世贸组织会上，有关发达国家提出开放全球服务贸易市场的倡议，成为南北双方分歧的焦点之一，其中的缘由也就不难理解了。

尤其是生态工业园区通过企业间的网络化联系实现相互之间的物质能量交换，这种关系反过来又加强了本地企业之间的相互依赖。很多生态化改进建立在企业之间长期合作的基础之上，从而大大增加了企业的本地植根性。尽管早先的生态工业园区存在为了环境利益而使居民牺牲经济利益的情况，比如前面提到的卡伦堡工业共生体系为了让居民使用热电厂的余热取暖，而拒绝引入相对廉价得多的天然气；但近年来，越来越多的

生态工业园区开始研究并注重发掘本地企业的网络化联系在降低地方整体生产成本和提高生产效率方面的潜力。理论上讲，成功设计的生态工业园区，应当不仅能把企业的生产活动留住，而且能为它们提供更加持久的竞争优势。既包括成本上，也包括技术创新、企业形象等方面。如果说，把绿色屏障作为一种贸易保护手段还会受到市场自由化势力的阻挠，那么这种立足于地方竞争优势的变革更能博取广泛的认同。

自然生态系统作为一个有机整体能把废物减少到最低程度。没有或者几乎没有一种有机体排出的废物对于另一种有机体来说不是有用的物质或能量的来源，物质和能量在一系列相互作用的有机体之间周而复始循环。受自然生态系统的启发，在工业生产中也可模拟自然生态系统，进行物质的循环再利用，减少废物排放、提高资源利用率，实现工业生产生态化的目标。由此产生了一门研究工业生产代谢过程的新学科——工业生态学，它为全面解决污染控制、资源利用，提高企业竞争力，提供了一种全新的观念与发展模式。工业生态学强调各企业的合作与工业共生体系建设，即将相互联系、不同类型的企业集中起来，建立生态工业园区(eco-industrial park，EIP)，组成工业生态链，使资源得到最优化利用，特别是相互利用废料(一个企业的废料作为另一个企业的原料)，实现工业生态系统的最佳运行。

生态工业思想对国际贸易、全球生产活动的实际影响，还有待实证检验，但从人类社会可持续发展的角度来说，对原有工业体系进行结构性的改革却是势在必行。很显然，利用全球市场自由化迅速实现工业化的机会一去不复返了，即使有，也要担负巨大的生态环境成本，乃至生态灾难的风险。积极面对生态工业革命，未尝不是抓住了一个新的发展机遇。我国在环境保护方面虽然一向态度积极，但是生态工业强调的三个基本点：改革一体化、引入非物质的价值评判标准和技术的长期演进性，却应当引起足够重视。

引进和推广生态工业园区的设计思想时，研究国外已有的生态工业园区的成功案例固然重要，但更要深入分析、了解自身的实际。保证生态工业园区能够建立在地方企业之间相互信任、长期合作的基础上。很多技术本身并不复杂，但是没有系统的配套合作，就无法采用，这也是技术的长期演进性特征所决定的。目前我国企业之间、部门之间呈现条块分割、相互隔绝、相互封闭的状态，对于推广这一社会性较强的生产组织形式十分不利，但是不能因为困难而放弃。一个比较现实的办法是从较小规模的区域层次做起，从新工业区做起，或者在工业区的规划改造过程中部分引入生态工业的思想，建设适合当地实际的生态工业园区。地方企业网络的形成是一个复杂的动态过程，不恰当的人为干预可能会事与愿违，起不到促进地方经济可持续发展的作用。

我国目前要力争保持一个较快的经济增长速度，快速的工业化和城市化的过程是无法避免的，但其中也面临着道路选择的问题。从发达国家的经验看来，人们对自身生活环境的关注会随着生活水平的提高而提高。因此，按照我国的发展目标，在 21 世纪环境问题将更加受到社会的普遍重视。生态工业所倡导的一体化的思想和自力更生的发展方向对我们这个世界第一的人口大国如何规划未来是有巨大借鉴意义的。

七、生态工业的范式

(一) 珠海生态园区范式

珠海市五个功能"一区四园一基地"的建设已开展了一段时间，并取得了明显的成效，在此基础上建设一个生态产业示范园区，具备了政策、行政管理等方面的优势。

1. 生态产业示范园区的职能

生态产业示范园区，包括了以下职能：

1) 现代高新技术农业，以形成农业产业化为龙头，除示范推广现代高新农业技术以外，还肩负着农产品市场开拓的职能，由此加速珠海市 45 万亩农业产业化进程，使第一产业—农业经济得到高层次的发展，即高科技含量、高经济效益和高环境效益。

2) 结合生态农业生产，开展农副产品加工、包装、无公害农药、化肥生产等农业生态工业的建设，同时结合生态环保的要求，开展环保工业产业、生态建材工业、节能工业、废物回收综合利用工业等生态型第二产业的建设；

3) 开展人工生态环保旅游业，建设具有珠海特色的热带、亚热带农业生态旅游基地、资源保护型旅游基地、生态环保教育基地等以带动生态型第三产业的发展。

4) 利用珠海市近期开展的大学园区建设，在生态产业区开展生态产业化实用技术的研究、推广，既可以成为国内外大专院校、科研院所的实验、实习基地，同时也可以建立一套应用型生态产业技术情报信息网络，为珠海市经济发展架起对外沟通的桥梁。

5) 结合珠海市的自然、社会资源优势，开展海洋资源、农业资源、林业资源、城市生态资源的项目设计、产业规划、产品开发、技术信息等高新科技研究推广。

6) 利用国内外人才技术，结合珠海的资源特点，设计各种生态产业项目，以有特色又现实可行和强大生命力的项目开展主动型、服务型对外招商活动，引进外来资金加强技术服务和产业政策配套服务，使生态产业在珠海各区域扎根、开花、结果。以此园区为中心，建立点面结合的生态产业网络，逐渐使珠海社会、经济、文化朝着具有生态环保特色的方向发展。

2. 生态产业示范园区的特点

作为新兴的产业——生态产业示范园区的建设应考虑生态产业区别于传统产业的特点：

1) 产业的横向耦合，使不同工艺流程的横向联系实现资源共享，变污染负效益为资源正效益。

2) 产业的纵向闭合，必须集生产、流通、消费、回收、环保及能力建设为一体，使一、二、三产业和信息产业在园区内部形成完善的功能组合。

3) 园区内生产区与区外相关的自然及人工环境构成产业生态系统——复合生态系统，这个系统越稳定，其生态效益就会更明显，逐步实现有害污染在系统内的全部回收和对外系统的零排放。

4) 功能方面，要考虑园区对整个社会的服务功能，因此除企业以产品或利润为经营目标以外，整个园区应协调好直接利益与间接社会经济效益之间的关系。

5) 园区中实行灵活多样的结构与体制，使之能根据环境的变化，及时调整产品结构，使产业结构趋于合理化。

6) 根据产业生态学的原理，对园区实行生态控制，建立具有自我调节和决策管理能力的体系，使园区能在建设中不断自我完善，并具备风险防范能力。

7) 建立健全硬件、软件研究与开发体系，组成一个配合默契的决策管理、工程技术和营销开发的人才体系。

8) 产业工人需一专多能，在生产过程中具有自觉设计和调控的能力，而不是机器的奴隶。

9) 完善的信息网络系统，使内外信息及技术网络具有畅通、灵敏、前沿和高覆盖度的特点，以保证对内服务、对外交流。

3. 生态产业园区建设的框架

根据以上这些产业特点，生态产业园区建设的框架包括：

1) 珠海市生态产业发展管理服务中心。该中心的职能是分析珠海市的资源特点，提出保护对策，引进国内外先进的技术，设计具有珠海资源特色的生态产业项目，开展招商引资和管理服务，建立以园区为中心基地，向全市辐射的生态产业网，建立生态产业经济，使生态产业逐步成为珠海的特色经济支柱。

2) 生态农业高新技术示范基地。该基地为集种、养殖在内的立体生态农业、发展生产性基础农业，同时负责新品种、新技术的本地化和技术示范推广；创立绿色食品，尤其是 AA 级绿色产品品牌，建立绿色产品技术体系，开拓绿色新产品市场，带动 45 万亩农业生产，起到农业龙头企业的作用；通过自然农业、生态农业、有机农业、生态农庄等建设，形成对外开放的生态农业旅游休闲度假基地，带动第三产业的发展；建立配套的农副产品加工包装工业，环保综合利用型有机肥生产厂、生物生化制品厂、植物保护剂生产厂、农业副产品综合利用工厂等一系列与农业、生物相关的生态型工业；生态农业技术交流中心和大中小学生教学实习基地，促进生态农业科普教育；对外辐射形成国内外农业产品市场网络体系，以贸易促进生产。

3) 非农业生态工业生产基地。该基地包括工业垃圾回收综合利用型工业、生活垃圾分类利用型工业、清洁生产工业、生态型建材工业等示范性工业，通过对这些工业的示范实践，制定生态工业产业政策，开展招商引资，引导珠海市工业朝着以生态工业为主导的方向发展，逐渐淘汰市内污染型工业，以保证全市有一个良好的生态环境。

4) 生态旅游基地化建设示范基地。在园区内开发生态旅游景观建设自然生态、人工生态及生态文化等旅游基本设施，形成综合型生态旅游示范基地和生态旅游产业服务体系，将园区与市区范围内的海洋生态旅游、农业生态旅游、人造生态景观旅游、自然生态旅游等景点建立成一个生态旅游的专线或网络，使珠海旅游成为名副其实的生态旅游，以此带动包括会议、展览在内的第三产业的发展。

5) 生态产业教育、培训、科研交流中心。该中心通过引进人才、技术，架起与国内外、大专院校、科研院所在发展珠海生态经济中的桥梁，使之成为生态产业科技成果

转化示范中心、人才技术交流中心、生态科技实验示范中心，不仅为园区发展提供所需的人才技术，而且为全市生态产业发展提供一个示范实验场所，同时通过对公众生态基础知识、实用技术及管理的教育培训，培养出生态产业发展所需的专门人才和产业工人。

6) 生态产业信息交流中心。在信息时代，要想发展生态产业，必须配备相应的软、硬件设施，建立产业信息服务中心，一方面可为本市生态产业经济的形成提供信息服务，另一方面，也是对外交流的一个重要窗口，通过这个窗口，扩大珠海生态产业在国内、国际生态产业界的影响，同时以此开展网上引资和技术、市场应急服务，以弥补本市在生态产业方面人才技术的相对不足。此外，作为生态信息产业，通过发展，可以形成具有明显社会、经济效益的第四产业，增加生态产业的发展潜力。

4. 生态产业园区的初期建设和运作方式

作为一个培育新的支柱产业的初级阶段，示范型生态产业园区的初期建设和运作需要市政府直接的组织领导和参与，为了便于园区的独立运作和协调部门之间的关系，可参考功能区及“一区四园一基地”的运作方式，在高新技术产业区的领导下开展工作；同时为了保证生态产业的良性发展，在技术保障方面可由市环保局等政府专业部门参与园区的建设和管理。

1) 园区的选址：可考虑在全市范围内选择生态环境保护较好的西部地区，根据生态示范区建设规划，最适合建区的地点在交通较为方便、生态环境好的农业生态示范区内，从建立稳定的人工系统的需要作为基点，园区需要 3000~10000 亩的土地(含优质农业用地、山地和水资源)，最终选址需要经过专家论证确定，此项工作可由市环保、国土规划部门来组织完成。

2) 园区的规划设计：在确定了选址后，应组织相关的部门，组织本市及国内外的专家分析调查珠海市资源基础，制定科学的生态产业规划和确定发展步骤。

3) 制定人才及技术引进所需的优惠政策，采用招聘与兼职相结合的办法引进先期发展所需的管理人员和技术人员，并组织相应的专家顾问组予以指导，保证项目建设之初就能走上正轨。

4) 根据园区建设的需要，划出相应的园区用地和提供必要的初期配套建设启动资金。

总之，珠海市在可持续发展道路方面已走在了全国的前列，在进一步深化改革，巩固和发展现有的社会、文化、经济及生态基础的过程中，需要培植独具特色的生态产业，通过生态产业示范园区的建设开展全市范围的生态城市建设，通过产业政策调整，使社会的生产、生活与生态管理职能的条块分割局面得以改善，消除以产量产值为主的政绩考核指标和短期行为，加强生态教育，提高全民素质，使城市形成一个稳定有可持续发展能力的复合生态系统。

（二）卡伦堡生态工业园区

丹麦的卡伦堡共生体系是生态工业园区建设的一个典型实例。卡伦堡是一个仅有 2 万居民的工业小城市，位于哥本哈根以西大约 100km 的北海之滨。卡伦堡工业共生系统主要有 5 家企业(阿斯耐斯瓦尔盖发电厂、斯塔朵尔炼油厂、挪伏·挪尔迪斯克公司、吉普洛克石膏材料公司和市政府供热公司)和 2 万居民组成一个相互依赖的网(图 6-1)。发电厂将余热变成蒸汽提供给炼油厂和挪伏·挪尔迪斯克公司及卡伦堡居民，炼油厂将用过的冷却水提供给发电厂作预热锅炉用水，并将生产过程中生产的液化气提供给发电厂和石膏材料公司作为燃料，发电厂烟气脱硫生成的硫酸钙直接卖给石膏材料公司替代天然硫酸钙，而额外回收的余热输往养鱼厂，生物工程公司将副产品提供给当地农民作肥料，形成了相互联系、互为依存、物尽其用、合理循环工业生态的良性系统。据初步统计，卡伦堡生态工业园区的经济、环境优势显著：20 年期间的总投资为 6000 万美元， 而由此产生的效益估计为每年 1000 万美元，投资平均折旧时间短于 5 年。整个区域减少资源消耗，每年节水 600 万 m^3、石油 4.5 万 t，煤炭 1.5 万 t；减少造成温室效应的气体排放和污染，每年减少二氧化碳 17.5 万 t，二氧化硫 1.02 万 t；废物重新利用，每年 13 万 t 炉灰(用于筑路)、4500t 硫(用于生产硫酸)、9 万 t 石膏、1440t 氮和 600t 磷。

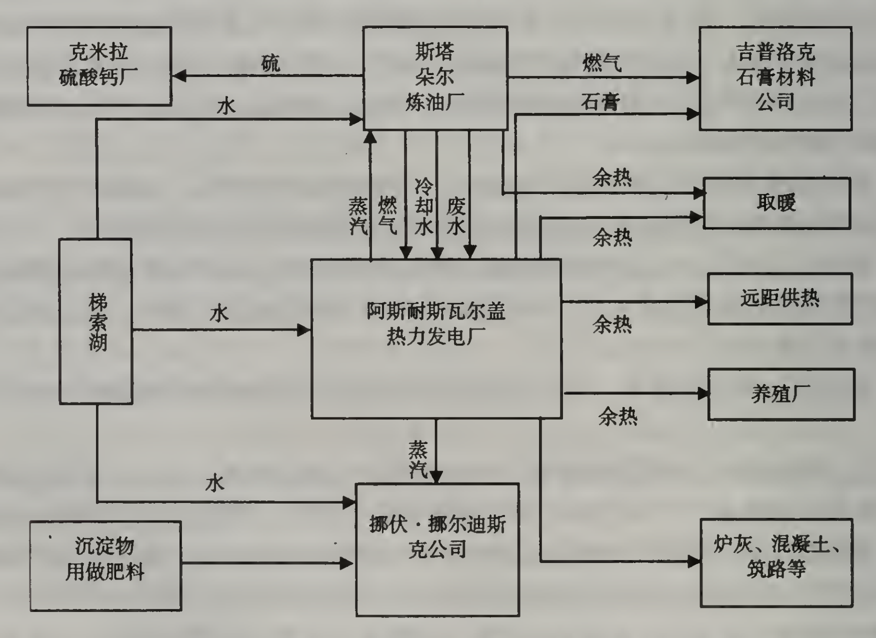


图 6-1　卡伦堡生态工业园区企业间主要废料交换流程示意图

八、生态工业的进化

尽管工业生态学概念不能按字面的意思来理解，但是，依据我们在自然生态系统循环方面获得的大量知识，这一类比概念值得我们详细展开探索。从理论上来说，生态工

业最初的基础已经奠定，但分析其有效性和在工业领域实际运用生态系统概念和系统工程都是刚刚开始。

关于地球生命进化的知识为我们提供了思考未来生态工业体系的基本的方法论，同生物圈一样，生态工业体系也是一个漫长进化史的结果。在生命的开始阶段，可用的资源无穷无尽，而有机生物的数量是那样得少，以至于它们的存在对可利用资源产生的影响几乎可以忽略不记，我们可以把它看成是一个线性进化过程。在这个进化过程中，物质流动是相互独立地进行。资源看起来是无限的，因而废料也可以无限地产生，生命因此可以长期保障其发展的条件。漫长时间内连续的“创造”，先是无氧发酵，然后是有氧发酵，然后是光合作用，我们的工业社会可以从中获得启发。

地球生命的最初阶段与现代经济运行方式之间的类比给人以十分强烈的印象：事实上，传统工业是一些相互不发生关系的线形物质流的叠加，其粗放的运行方式，简单地说，就是开采资源和抛弃废料，这是我们环境问题的根源所在。工业生态学理论的主要探索者之一，Allenby 提出将这种运行方式命名为一级生态系统(图 6-2)，从图中可以看出：在进化过程中，资源变得愈来愈有限。在这种情况下，生命有机体之间的相互依赖关系也愈加明显，并组成了复杂的相互作用的网络系统，像我们在生物群落中所见到的那样。不同组成部分(种群)之间的，也就是说，二级生态系统内部的物质循环变得极为重要，资源和废料的进出量则受到资源数量和环境容纳废物能力的制约(图 6-3)。

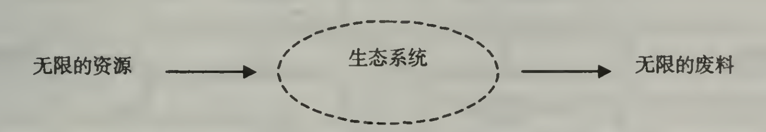


图 6-2　一级生态系统示意图(资料来源：Allenby)



图 6-3　二级生态系统示意图(资料来源：Allenby)

与一级生态系统相比，二级生态系统对资源的利用虽然已经达到相当高的效率，但也仍然不能长期维持下去，因为物质、能量流都是单向的：资源减少，而废料不可避免地不断增加。

为了真正转变成为可持续的形态，生物生态系统进化成以完全循环的方式运行。在这种形态下，资源与废料之间的界限变得模糊了，因为，对一类有机体来说是废料，而对另一类有机体来说是资源。只有太阳能是从系统外部获得的。我们仍然运用阿伦比建议的术语，这可称作三级生态系统(图 6-4)。在这样的生态系统之内，众多的循环借助

太阳能既能以独立的，也能以互联的方式进行物质交换。这种循环过程在时间长度和空间规模两种尺度上的差异性相当大。理想的工业社会(包括基础设施和农业)，应尽可能接近三级生态系统。

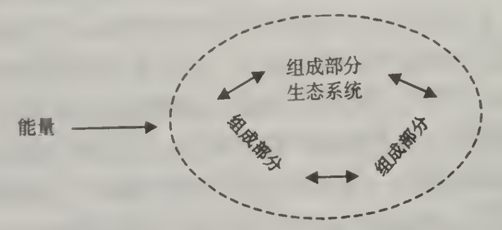


图 6-4　三级生态系统示意图(资料来源：Allenby)

依据上述自然生态系统进化的原理，一个理想的工业生态系统包括四类主要行为者：资源开采者，处理者(制造商)，消费者和废料处理者(图 6-5)。由于集约再循环，各系统内不同行为者之间的物质流远远大于出入生态系统的物质流。

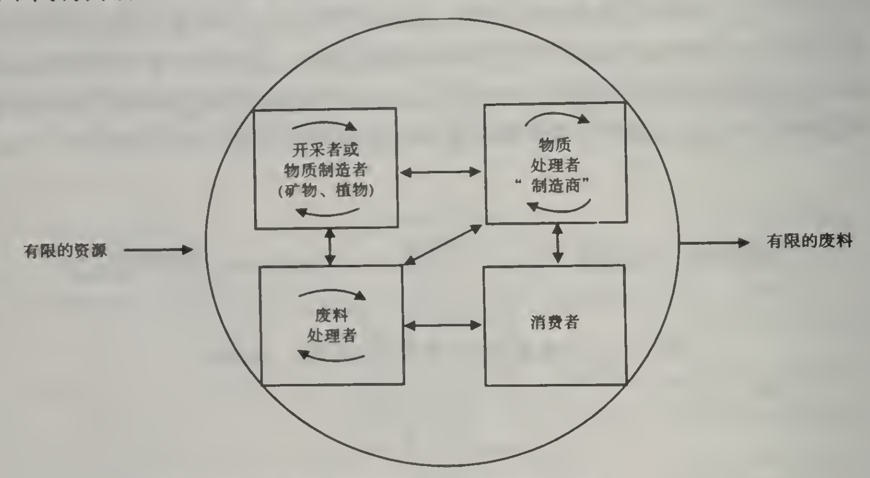


图 6-5　理想工业生态系统示意图(资料来源：Allenby)

人类活动，特别是工业革命以来的发展活动，在很大的程度上属于一级生态系统的范畴。产品的使用寿命常常极短，往往仅使用几星期，甚至几天。大部分的原材料的使用可以说是毫无价值的，它们仅使用一次以后便被扔掉，散落于周围环境之中。使用的许许多多产品是消耗性的，如润滑剂、溶剂、油漆、杀虫剂、肥料甚至轮胎。废物再循环利用微乎其微。而且，消费后废弃物的再利用的方式，往往也是污染活动，对环境的潜在影响至今也不得全知。

同生物化学反应相反，工业生产使用的矿物能源是不能再生的。在这个意义上，今天的工业生态系统，是建筑在矿物燃料的基础上，与生物进化的初级阶段十分相似：最原始的有机物从生物史前时期长期积累的有机分子储备中汲取能量。

与由太阳能促使产生的再生循环(生物地球化学循环)不同，目前的工业生产过程只是转化过程中阶段性的和不可逆的线性片段而已。过程从采掘原材料开始，继之以物理

的分选、提炼，尔后还原或化合成初级的中间体。这样，人们可以得到构成工业社会第一基础的原料、基础金属或以纯净形态出现的其他元素，诸如纤维素、碳酸钠、甲烷、丙烷、苯、二甲苯、甲醇、乙醇、乙烯、丙烯等等。这些初级材料的获得需要经过吸热反应，往往通过外加能量来实现。在大多数情况下，获得能量的初级材料经过放热反应后，加工和化合成预想的物理的和化学的形态。因此，这些初级材料含有必要的能量，经反应化合成最终产品。可以说，它们所起的作用类似于生化系统中三磷酸腺苷(ATP)的作用。然而 ATP 是可以在细胞内部以循环方式再生的。与此相反，初级中间体却是不能再生的，以不可逆方式包含在产品之中，这就是工业代谢与生物代谢最根本的区别所在。

在近亿年的过程中，生物圈产生了一个三级生态系统运行所需的一切要素。而我们的工业体系正艰难地和部分地从一级生态系统向二级生态系统过渡，由于一些更新的资源(如水、土地等)的存在及防治污染的立法或经济利益的驱动(如贵重金属的回收利用)，工业体系也只是半循环的。

工业生态学思想的主旨是促使现代工业体系向三级生态系统的转换。转换战略的实施包括四个方面：将废料作资源重新利用；封闭物质循环系统和尽量减少消耗性材料的使用；工业产品与经济活动的非物质化；能源的脱碳。

生态学概念运用到工业体系最重要的贡献在于工业生态学所提倡的整体的、一体化的观念。特别是从对生态运行与调节机制的认识中获得的由理论生态学发展起来的控制论知识。从长远来说，对生物生态系统和工业生态系统的调节机制的探索，可能演化成一种用于优化工业生产体系的战略理论。其中工业代谢理论研究的是工业系统所有组成部分功能的总和。其基本目标是分析与描述，与人类活动相关的物质与能量的流动与储存的动力，从资源的采掘直到生物地球化学循环过程，这是物质不可逆转并迟早要发生的循环。借助于对生态系统和生物圈的认知，找到能使工业体系与生物生态系统“正常”运行相互匹配的可能的革新途径。因此，工业代谢研究是工业生态学不可缺少的先决条件，也是工业生态学相当长时间内的研究课题。

第二节　清 洁 生 产

一、清洁生产的生产背景

第二次世界大战以后，随着世界范围经济工业化和社会城市化的发展，人类对自然资源和自然环境利用、改造的规模和速度空前加大，从自然界获得的财富不断增加，促进了各地区经济和社会的迅速发展。与此同时，进入片段生态环境的废物和污染物也越来越多，超出了自然界自身的消化吸收能力，既污染环境，又对人类造成威胁。而且，工业化也将发展，使自然资源的消耗超出其恢复能力，破坏全球生态环境的平衡。因此，如何协调好经济增长与资源日益短缺、生态环境恶化之间的关系，已成为全世界所普遍关心的重大课题。

环境问题是 20 世纪以来人类备受关注的问题。由于工业化大生产的飞速发展为人类创造了丰富的物质财富，推动了人类文明的进程，但同时引发了全球气候变暖、臭氧

层破坏、生物多样性减少、酸雨扩张、水域生态系统污染严重、大气污染加剧、固体废物成灾和生态破坏等全球性环境问题。20 世纪 70 年代以来上述问题有愈加严重的趋势，由人类自身活动造成的环境污染和生态破坏如果得不到控制，继续蔓延下去，将会使我们的子孙后代成为“环境难民”。面对这种严峻的挑战，人类为解决环境问题进行了不懈的努力，也付出了沉重的精神和物质代价。70 年代初期，西方国家开始对工业化给环境造成的危害有所认识，他们采取污染物转移到海洋或大气中的对策，认为自然生态系统可以将这些污染物分解或吸收。70 年代后期，生态系统的深入研究和理论发展，推动了人们环境意识的更新，开始认识到任何自然生态系统的自调节和自平衡能力都是有限的，超过一定阈值生态平衡就会失调，生态就被破坏，在一定时间内生态系统对污染的吸收承受能力与其生态效率有密切关系。据此开始依生态系统的承载能力制定污染排放指标，提出一次性污染排放限度和标准，这样使企业采用了相应的排放对策即污染物稀释后排放。这种方法并没有使生态系统中污染物的绝对含量减少，环境问题还在加重。

20 世纪 80 年代，人们在深入研究的基础上，提出了持续发展的概念，从而将发展与环境建立在新的理论基础上。这是人类认识上的一个巨大飞跃。持续发展的基本原则是人际和代际公平，它要求把当代人相互之间的需要及当代人与后代人的需要联系起来。持续发展要求做到：一是资源、能源的永续利用；二是环境容量的持续承受能力。二者缺一不可。至此，就要最大限度地节约可再生和不可再生资源、能源，保障资源不受破坏、环境不受污染，保证环境容量的永续性。

从工程技术角度，认为可持续发展的标志是：转向更清洁、更有效的技术，尽可能接近“零排放”或“封闭式”工业，尽可能减少能源和其他自然资源的消耗。而且当前“地球所面临最严惩的问题之一，就是不适当的消费和生产模式，导致环境恶化、贫困加剧和各国的发展失衡”(《21 世纪议程》)。“若想达到适当的发展，需要提高生产效率以及改变消费，以最高限度地利用资源和最低限度地产出废弃物，这将要求工业化国家重新制定发展模式……”而要改变不合理的生产模式，就必须推行清洁生产，发展现代化的集约经营的生态工业，这是实现可持续发展的必由之路。目前，不仅在美国，而且在丹麦、荷兰、英国、加拿大、泰国、澳大利亚等国也都兴起了清洁生产的浪潮，并取得很大成功。

20 世纪 80 年代中期，人们开始开发污染处理技术和注意到废弃物的资源化再利用，称之为末端治理。在十几年来污染控制的末端治理实践中，显露出诸多弊病如基建投资大、运行费用高、残余污染物存在、污染物的换介质排放和造成二次污染等。末端治理的生态单一性与企业的经济目的性相抵触，造成生态环境保护与生产经济利益难以有效结合，末端治理成为“头痛医头，脚痛医脚”的被动污染防止方法，致使这种污染控制方式难以奏效，许多环境问题更趋恶化，从而得不到预期效果。

基于世界性环境问题的上述现实，清洁生产一词于 1989 年被联合国环境规划署提出，认为它对可持续发展的意义重大，并启动了清洁生产计划。1992 年，联合国在巴西里约热内卢举行了“环境与发展大会”，有 183 个国家、102 位国家元首或政府首脑和 70 个国际组织出席，在大会通过的《21 世纪议程》中，首次正式提出清洁生产的概念，强调指出“实行清洁生产是取得可持续发展的关键因素”。此后有近百个国家和地

区实行了清洁生产。1998 年 9 月第五届国际清洁生产研讨会在汉城召开，会议期间与会各国签署了国际清洁生产宣言，这标志着清洁生产已经成为世界各国公认的实现资源永续利用、经济持续增长和环境不断改善的重要措施。1994 年国务院通过的《中国 21 世纪议程》，把清洁生产作为优先实施的重点领域，1996 年召开的全国环境保护会议颁发了《国务院关于环境保护若干问题的决定》，再次强调要推行清洁生产。到目前为止，我国已有 20 多个省(自治区、直辖市)开展了清洁生产，10 多种行业的 220 多个企业进行了清洁生产审计。目前，清洁生产工作组在联合国环境署的提议下，对在我国推行清洁生产的机制进行研究，并以太原市为我国惟一的清洁生产市级试点，清洁生产正受到日益关注，形成从上到下各阶层的共识。从上述清洁生产提出的生态环境背景出发，分析清洁生产的生态经济特征和原则，进而讨论推行清洁生产对实现生态经济良性运行具有重要意义。

从我国环境保护实际出发，20 世纪 70 年代就明确提出了“预防为主，防治结合”的环境保护方针，强调通过合理布局，调整不合理的、高能耗物耗和污染环境的产品结构、原材料结构、能源结构；鼓励积极进行技术改造和“三废”的综合利用；加强环境监管等措施防治工业污染。“预防为主”的方针侧重于污染物产生后的处理处置达标，强调末端治理。末端治理的效应应该予以肯定，它不仅使污染物的超标排放达到有效遏制，还缓解了一些突出的污染问题。然而末端治理付出的代价也是昂贵的，环境污染仍无法从根本上得到解决。这是因为末端治理存在着以下一些难以克服的不足：① 末端治理的投资大，建设周期长，运行费用高，经济效益低，企业只是在消极被动的状态下实施；② 资源和能源得不到有效利用，造成资源的极大浪费和环境污染的加剧；③ 末端治理有一定的风险性，容易造成二次污染事件的发生；④ 末端治理加大了环境监管难度，偏重于末端控制，忽视全过程控制。

针对末端治理的上述不足，中国对清洁生产也进行了有益的探索和实践。早在 20 世纪 70 年代初就提出了“预防为主，防治结合”,“综合利用、化害为利”的方针。80 年代推行少废和无废的清洁生产过程。在 90 年代提出的《中国环境与发展十大对策》强调了清洁生产，清洁生产成为我国工业污染防治工作战略转变的重要内容，成为我国实现可持续发展战略的重要措施和手段。

二、清洁生产的基本概念与特点

(一) 清洁生产的基本概念

清洁生产(cleaner production)这一概念是联合国环境规划署工业与环境规划活动中心在 1989 年首先提出的，目前对这一术语，国际上尚未做出统一的定义。在一些国家和地区有一些不同叫法，如污染预防、废物最小量化、废物减量化、源控制及清洁工艺等。

1989 年联合国环境规划署将清洁生产定义为：“清洁生产是将综合预防的环境策略持续地应用于生产过程、产品和服务之中，以便增加生态效率和减少对人类以及环境的

风险性。对生产过程包括节约原材料，淘汰有毒原材料，降低所有废弃物排放的数量和毒性；对产品来说，主要是减少产品在整个生命周期中(包括从原材料提炼到产品的最终处置)对人类和生态环境的影响；对服务而言，要求将环境因素纳入设计和所提供的服务中。清洁生产不包括末端治理技术，如空气污染控制、废水处理、固体废弃物焚烧或填埋。清洁生产通过应用专门技术，改进工艺技术和改变管理态度来实现。”

1994 年的《中国 21 世纪议程》中结合我国环境现状和未来对策指出“清洁生产是既可满足人们的需要又可合理使用自然资源和能源，并保护环境的实用生产方法和措施，其实质是一种物料和能源消耗最少的人类生产活动的规划和管理，将废物减量化、资源化和无害化，或消灭于生产过程中。同时对人体和环境无害的绿色产品的生产也随着可持续发展进程的深入而日益成为今后产品生产的主导方向”。清洁生产概念的产生是人类在实现生态环境和经济增长协调发展实践中创造的全新性生态经济战略目标，是具有开拓性的新观念、新概念和新技术，已经在许多国家兴起了清洁生产浪潮，并获得了巨大的生态效益和经济效益。清洁生产定义的核心思想可图解如下(图 6-6)。

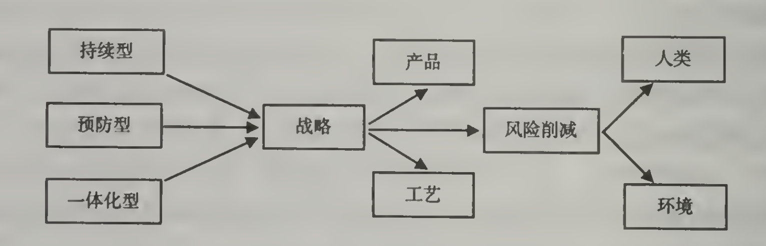


图 6-6　清洁生产的核心思想

(二) 清洁生产的特点

从上述定义不难看出清洁生产实质上是一种“生态化”或“绿色化”的工业生产模式，是实现生态工业的有效途径，我国已经把推行清洁生产作为一项重要的环境污染预防战略正在实施。清洁生产的基本特点是：

1) 事先防止。清洁生产是针对工业生产中可能产生的浪费资源和形成污染等经济与生态不协调问题，从源头抓起，防患于未然，而不是事后补救。

2) 全过程防止。清洁生产是全过程、全环节、全要素的防止，而不是单一的最终结果的考查，因此它能挖掘生产过程的全部经济生态潜力，用于防止经济与生态不协调的问题的产生。

3) 积极预防。清洁生产是积极的预防，而不是消极的治理。这样就免除了工业生产过程中一切不必要的人力和资源浪费。因此，发展生态工业，实行清洁生产，是实现经济与生态协调发展的一条新途径。

4) 完善企业管理。清洁生产要求制定保证清洁生产的规章制度和操作规程，并监督实施。清洁生产通过对企业管理人员和操作工人的培训，提高他们的管理意识和环保意识，调动职工参与管理的积极性。

5) 强调技术创新。清洁生产是企业技术创新的催化剂，也是生产工艺革新的动力源。将清洁生产纳入到技改中，能够推动企业清洁生产技术的研究、开发和推广转让，不断改变企业技术落后的状况。

三、清洁生产的内容

清洁生产的内容可以直观的概括为图 6-7，具体包括三个方面：

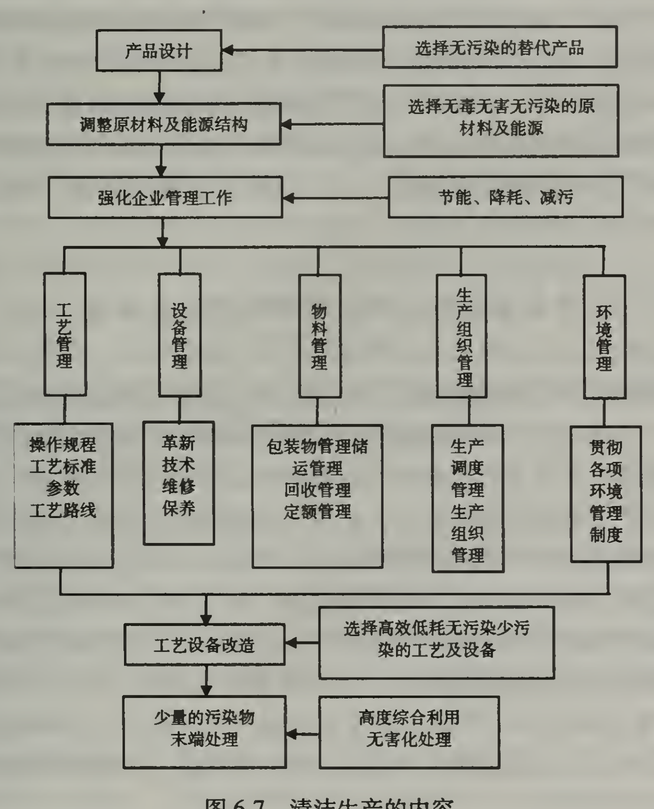


图 6-7　清洁生产的内容

（一）自然资源和能源利用的最合理化

包括常规能源的清洁利用、可再生能源的利用及各种节能技术的开发等。常规能源的清洁利用即提高能源利用效率，减少能源在开采、加工转换、储运和终端利用过程中的损失和浪费。比如洁净煤生产，既减少了环境污染，又提高了煤炭的利用效率。对于工业企业来说，首先应在生产资料产品和服务中，最大限度地做到以最少的原材料和能源消耗，生产尽可能多的产品，提供尽可能多的服务。第二是积极利用连续性能源，这类能源具有可再生性和反复利用的特性。为了达到能源的持续利用，应调整能源消费结构，从不可再生的耗竭性能源转向可再生能源，最大限度地节约能源，减少能

耗。依靠科技，加大太阳能、生物能、风能等新能源的开发利用。主要包括：节约原材料，利用无毒和无害原材料；减少使用稀有原材料；现场循环利用物料；利用清洁能源；利用可再生能源；开发新能源；节约能源，实施各种节能技术和措施。

(二) 经济效益最大化

即通过不断提高生产效率，降低生产成本，增加产品和服务的附加值，以获取尽可能大的经济效益。通过生产全过程的各个环节严格管理和技术革新与工艺创新，采取一切合理的措施减少能源、原材料的损失和浪费，回收可再利用的物料和能源。调整优化产业结构和产品结构，依靠技术进步，采用新工艺、新设备和新技术，达到节能的目的。要实现经济效益最大化，企业应在生产和服务中最大限度地做到：减少原材料和能源的使用；采用高效生产技术和工艺；减少副产品；降低物料和能源损耗；提高产品质量； 合理安排生产进度；培养高素质人才；完善企业管理制度；树立良好的企业形象。

(三) 产品清洁型，对人类和环境的危害最小化

清洁产品是指在生产、使用过程中及使用后不会危害人体健康和生态环境；易于回收、复用和再生；合理包装；合理的使用功能和使用寿命；产品报废后易处理、易降解等的产品。它要求在生产活动和预期的产品消费活动过程中把对环境的负面影响减至最小。强调产品在生产过程中及使用后不含危害人体健康和生态环境的因素，易于回收、复用和再生，具有合理的使用功能和使用寿命。为此，工业企业应在生产资料产品和服务中最大限度地做到：减少有毒有害物料的使用；采用少废和无废生产技术和工艺；减少生产过程中的危险因素；现场循环利用废物；使用可回收利用的包装材料；合理包装产品；采用可降解和易处置的原材料；合理利用产品功能；延长产品寿命；尽量少用、不用有毒有害的原料/中间产品；减少或消除生产过程中的各种危险因素；采用高效率设备和无(少)废工艺；进行简洁、可靠的操作和控制；回收再利用物料/中间产品；改善企业管理等。

开发清洁产品，对产品进行全新设计，对推动清洁生产具有显著的推动作用。目前，低消耗、低污染的绿色产品受到越来越多的消费者青睐，其市场竞争力和吸引力稳步提高，发展前景广阔。

四、清洁生产的生态经济原则和意义

(一) 清洁生产的生态经济原则

清洁生产是实现可持续性的重要途径，它使经济发展和环境保护相一致，有助于克服以往环境保护与经济利益之间的矛盾，清洁生产的核心是使社会、经济、环境各个部

门从传统的发展战略和经营方针中解放出来，通过强化管理、严格核算、降低消耗、增加效率、提高质量和减少污染等，保护好资源和环境，实现生态经济系统的持续运行。为此，我们提出下列清洁生产的生态经济原则：

1. 经济效益原则

清洁生产不单纯是一种预防污染的方法，它是用全新的思维方式，重新选择经济增长的战略举措。对经济结构进行战略性调整是我国国民经济发展的近期需要和长期任务。清洁生产的目的就是要达到预防污染和提高经济效益，实施清洁生产可以从宏观上调整和优化经济结构，解决影响环境的结构性污染和工业布局等问题，从微观上在生产系统内部推行降耗、减污、提高管理水平和企业综合素质，在不影响经济效益的前提下，促使人们从根本上主动地解决环境污染问题。

清洁生产与末端治理相比更加强调经济效益原则。末端治理是把污染物全部集中在尾部进行处理，由于污染物数量多、负荷大，一次性投资和运行费用高，尤其是污染源分散时，很难发挥投资的规模效益和综合效益；末端治理着眼于末端净化，不考虑全过程控制，只重视污染物净化和减少污染排放，忽视资源、能源最大限度的利用和减少污染物的生产量，所以，资源、能源浪费严重；末端治理的高投入少产出，仅有局部的环境效益，没有经济效益，难以调动生产者治理污染的主动性。清洁生产全面考虑产品、生产过程和产品的售后服务三个方面，尽可能地减少对资源的消耗，也尽可能地减少对环境的污染，使产品成本极大地降低，提高经济效益。

2. 生态效益原则

清洁生产要求在产品开发的全过程中均考虑环境因素，从产品的整个生命周期减少对环境的影响，最终形成一个可持续的生产和消费系统。实施清洁生产不仅能提供满足人类需求和提高生活质量的产品和服务，更能使整个生命周期内的生态影响和资源强度逐步减少到与地球的承载力相适应的水平。这样的生态效益原则是清洁生产与其他任何环境治理的根本区别。

清洁生产全过程控制环境污染可分为三个层次：首先是在社会-经济生态系统层次上的控制，包括生产、流通、分配和消费等环节的控制。在实施清洁生产的过程中该层次是按产品的生命周期不同时期的生态效应特点控制的，包括产品报废后的回收利用。第二是产业生态系统层次上的控制，包括基本建设、技术改造、产业活动(生产和供销等)过程的控制。在实施清洁生产的过程中该层次是按照选点、布局、方案选择(产品、原材料能源、工艺设备等)、生产组织形式、施工建设、投产运行、生产工序和销售活动的各环节的生态效应特征，采取控制对策。第三是企业生产生态系统层次上的控制，包括产品设计、原料能源选择、原材料的采购与储运、生产工艺与设备的确定、生产管理和产品的后处理等全过程控制。在清洁生产的实施过程中特别注重生态设计，从清洁的原料起步，到绿色环保型产品的再生产，每个环节都体现出颇优的生态效益。

3. 技术创新原则

清洁生产本身就是相对性概念，一项清洁生产技术是与现有的生产技术比较而言

的，因此，在实施清洁生产的过程中特别要遵循技术创新的原则。清洁生产的生命力如何就是看与它们所代替的现有技术相比有无技术创新，清洁生产技术的创新机会在产品生产的全过程随时可以捕捉到。因此，清洁生产技术的创新不仅工程师和技术人员有责任，各级领导和一线职工的作用也不可低估，尤其是低/无废清洁生产技术的提出和实施。清洁生产的技术创新主要包括工艺创新、过程控制创新、设备及其改进、产品的生态设计和管理技术等方面。其中技术改造是推动清洁生产的一条重要途径，企业的技术更新、设备改造应着眼于以技改促进清洁生产，把清洁生产融合到技改之中，彼此衬映，相得益彰。

清洁生产技术创新的程度，只有通过该项技术所获得的经济效益、生态效应和社会效应的分析和评价来确定。分析评价的指标至少应包括：经济方面的成本低、风险少、质量高和市场广；环境方面的资源能持续利用、物能消耗少、污染排放低、环境影响小和绿色性能好；社会方面的产品共享、优化寿命、促进文明进步和有利于可持续发展等。清洁生产的技术创新原则使污染的末端治理方式转到污染产生的生产工艺过程上，体现为生产技术的革新。

4. 循环再利用原则

清洁生产的基本思路之一是尽可能多采用物料的循环利用系统或重复利用系统，比如水的循环利用及重复利用系统，以达到节约资源减少排污的目的。资源通过多途径利用是企业成本降低，投资回报率提高，环境风险减少的途径。在实施清洁生产的过程中首先要进行物料平衡分析，从中发现可利用废弃物进行再用和循环使用，制定相应的物料和废物回收/循环利用和资源化清洁生产方案。清洁生产中循环再利用的内容包括物料的循环利用、产品的再用、再制造和再刷新、生产过程中废弃物的再利用。

循环再利用原则是企业生产生态系统良性运行的重要标志，在系统内部有利于提高每一道工序的原料和能源利用率，减少生产过程中资源的浪费和污染物的排放；在系统外部，循环再利用原则要求企业应对其产品在使用过程及失去使用功能后的环境影响承担责任，尽可能回收旧产品或对其进行再生产，以避免过度的资源消耗和减少环境影响，提倡生产生物降解性能好的产品，减少废物在系统外部的积累，造成对生态环境的不良影响；也可通过不同生产生态系统间的功能再组合，形成物料循环再利用、重复利用的生态工业园区。

（二）清洁生产的生态经济意义

清洁生产是一种连续不断实施的战略，是世界各国实现经济、社会可持续发展的必然选择，实行清洁生产的关键是要求工业生产提高能效，开发更清洁的技术，更新、替代对环境有害的产品和原材料，实现环境和资源的保护与有效管理。

清洁生产是控制环境污染的有效手段，它彻底改变了过去被动的、滞后的污染控制手段，强调在污染产生之前就予以削减。国内外实践证明，清洁生产具有高效率，可获得显著的经济效益和生态效益，可大大降低末端处理负担，提高企业市场竞争力。

清洁生产的核心是解决工业污染和减缓资源耗竭，中心任务是原料的充分利用和合理利用。与粗放增长模式相适应的传统工业污染控制战略，是以污染末端治理为特征的，注重污染物的处理处置方式和途径。由此可见，以预防为主，进行生产全过程控制的清洁生产，从根本上打破了传统的末端治理模式，既保证了对生态环境危害的最小化原则，也满足了企业经济效益的最大化要求。因此清洁生产的提出和推行是经济与环保一体化发展的必然趋势，是实现可持续发展战略的重要举措。

清洁生产的显著生态经济意义是：从上述四个原则出发，控制污染于生产全过程，具有良好的实施动力，而且能够获得显著的经济效益、生态效益和社会效益，反过来又激励企业去开发更清洁的生产技术，形成良性循环；使环境保护从被动的末端治理跨人主动的清洁生产和生态经济治理轨道，促进工业发展和环境管理模式走向经济和环境可持续发展的道路；清洁生产能促进产业结构和经济结构的调整和优化，以利资源的合理配置和利用，既满足当代人的需求，又不会给人类未来造成不利隐患；清洁生产的实施能够丰富和完善工业企业的管理思想，规范管理制度；推行清洁生产能够促使企业实现外延发展目标，最大限度提高材料的可再循环性和资源的可再生性，实现生态工业园区化。

（三）我国实施清洁生产的必要性

我国大力推行清洁生产是由我国的国情特点决定的。我国的国情特点主要表现是：人口多，资源相对紧缺，经济发展和技术水平还较为落后，产业结构配置不尽合理且产品附加值较低，环境污染比较严重，生态环境脆弱。传统的、落后的发展模式和生态环境恶化的状况亟待需要改变，否则可持续发展就是一句空话。

实施清洁生产是转变经济增长方式的需要。我国在经济快速发展过程中，发展与资源、发展与环境污染的矛盾日趋尖锐，只有通过实施清洁生产才能实现资源的综合利用和大力节约能源，挽回环境污染、生态恶化的被动局面。据资料统计，我国固体矿产资源总储量居世界第二位，但人均占有量只占世界人均占有量的 1/2，排于世界第 80 位。我国的水资源总储量为 2.8 万亿 m^3，位居世界第 6 位，但人均不及世界人均占有量的 1/4，目前已有 110 个城市严重缺水，属严重缺水国家之一。我国每年的废污水排放总量已经达到了 620 亿 t，大部分未经处理就直接排入江河湖泊，86%的城市河段水质超标，地面水污染加剧，守着江河没水喝并非夸大其辞。我国的能源结构以煤炭为主，煤炭占商品能源总消费的 73%，75%的工业燃料和动力、85%的城市居民用燃料和65%的化工原料都是由煤炭提供。因此，大气污染形势在短期内根本改变无望，酸雨形势也不容乐观。与发达国家相比，单位产值能耗高，单位产品能耗高和资源消耗量大，水资源利用率低。因此，调整产业能源结构和消费结构，大力推行清洁生产，是实现经济增长方式由粗放型向集约型转变的必由之路，也是解决资源与环境问题的根本措施。

实施清洁生产是产业结构调整的需要，产业结构合理与否，直接影响到经济发展的效益与可持续性。产业结构调整的目的是要淘汰一批能耗高、效益差、污染重、浪费资源的落后产品，这与清洁生产节约能源、减少原材料消耗、提高产品质量、预防污染和

资源综合利用的目标是完全一致的。可见，产业结构调整所鼓励发展的重点产业应该包括新兴的环境保护产业，鼓励推行清洁生产工艺和技术，发展清洁生产产品，特别要促进具有环境保护标志的产品的生产与使用。这是消除结构污染的正确途径。

另一方面，我国目前的产业结构的一大特征是第三产业比重过低。第三产业与第二产业相比单位能耗创造的 GNP 和就业机会较多。因此，第三产业比重较低对环境保护而言，意味着要以较多的能耗和较多的污染物排放换取同样的 GNP 增量。我国大气污染属煤烟型污染，以烟尘和酸雨危害最大。统计资料表明，我国环境污染的 70%来自工业。1997 年全国二氧化硫排放总量为 2346 万 t，其中工业来源排放量占 78.9%；烟尘排放量为 1873 万 t，工业排放占 83.6%；工业粉尘排放总量为 1505 万 t。全国 500 多座城市中，大气质量符合国家一级标准的不足 1%。工业企业对环境污染的贡献之大可见一斑。因此，在工业企业广泛推行清洁生产，挖潜革新，是控制工业污染、节能降耗增效的最佳选择。

实施清洁生产有利于增强我国参与国际竞争的能力。清洁生产对当代世界各国经济发展和环境保护的影响是深远而广泛的。影响之一，将是最终改变各国的工业结构，其结果直接影响到各国经济总体发展方向和水平、影响到各国技术和产品的国际竞争力。一些发达国家，如美国、荷兰、比利时、德国、法国等，在将改善工业结构纳入污染预防的控制方面已做出努力，这无疑将大大增强它们在国际竞争中业已遥遥领先的能力位。而且，这一努力还在加强，其标志之一是这些国家对清洁生产技术的研究与开发日益重视。我国已加入 WTO，改革开放的步伐将不断加快和力度也将全方位的加强，为同国际市场接轨，在参与国际竞争中取得优势，就必须提高产品质量，降低成本，控制污染，生产有机清洁产品和绿色清洁产品，从而提高企业和产品的知名度。

实施清洁生产是国际环境保护形势对我国工业污染控制提出的新挑战。1992 年联合国环境与发展大会标志着国际环境保护也已进入新的发展阶段，走持续发展道路成为当今世界的主旋律。因此，预防污染、保护资源和环境是全人类共同的责任和义务。在行动上，我国已签署了一系列国际环境公约，承担了保护臭氧层、防止全球变暖、保护生物多样性和湿地保护等国际责任和义务。这些都要求我们的工业企业必须树立全新的产业理念，积极推行清洁生产所倡导的全过程控制污染的防治战略。

五、清洁生产的方法

(一) 源　消　减

即在废物产生之前最大限度地减少或降低废物的产生量和毒性。“源消减”可细分为“加强管理”和“改进生产过程”。

“加强管理”主要是指规范例行检测，分析物料流向、产品状况和废物损耗等，科学调整生产计划，合理安排生产进度，不断改进操作程序等。具体措施包括：例行检测生产过程和原料投放；防止物料和能量损耗；分流、分类、分置；合理安排生产进度；改进原料的处理方式；总结生产管理经验；开展设备操作培训。

“改进生产过程”主要是指重新定位、设计产品，改造、替代落后生产工艺，调整原料、能源使用，优化生产程序等。具体运作包括：提纯原材料；开发原材料替代品；改进生产工艺和流程；调整生产车间总体布局；提高生产自动化管理水平；更新生产设备；重新设计产品；提高产品寿命；开发新产品；改变产品结构或成分。

（二）现场循环回收利用

即在生产现场对能源、原材料和水资源等进行循环回收和重复利用。“现场循环回收利用”可细分为“现场循环利用”和“现场回收利用”。

“现场循环利用”是指在原生产工艺流程中增设物料、能流闭路循环回用系统，使生产过程中先期损失的物料和能量得以在后续环节中返回生产流程，并被重复利用。具体内容包括：建立闭路循环回收系统；循环回用物料和能量。

“现场回收利用”是指厂(场)内某一生产线利用从其他生产线回收利用的物料和能量。具体做法包括：建立厂内回收系统；加工回收物料；开发副产品。

六、实施清洁生产的工作程序

工业企业实施清洁生产的工作程序如图 6-8 所示。

(1) 筹划与组织

筹划与组织是企业实施清洁生产的准备与策划阶段，关系到清洁生产工作的实施效果。一个必要条件是必须得到企业最高决策层的坚强支持和积极参与。由于清洁生产关系到企业的全部生产过程和管理部门，需要企业全体员工参与、帮助和支持。如果没有最高决策层的直接领导，将不可能取得好的结果。

筹划和组织阶段主要应做好以下几项工作：一是组建清洁生产审计队伍。清洁生产的核心内容是对企业的生产过程进行清洁生产审计，组建一个高层行政领导、高级技术人员和有关管理人员参加的审计小组是第一步。二是制定工作计划。审计工作必须遵循一定的规范和程序，制定一个有工作内容、目标责任和进度安排、预期效果的计划是必要的。三是对企业全体员工进行宣传、动员，并开展必要的研讨、咨询，使全体员工理解并接受清洁生产的概念和方法，克服一些思想观念、日常管理及经济、政策等方面的障碍。四是进行必要的物质准备，包括后勤保障及必要的分析测试和计量设备、装置。

(2) 预评估

预评估是清洁生产审计的初始阶段，是发现问题和解决问题的起点。主要任务是调查工艺中最明显的废物和废物流失点；耗能和耗水最多的环节和数量；原料的输入和产出；物料管理状况；生产量、成品率、损失率；管线、仪表、设备的维护与清洗。在此基础上确定审计重点。同时对已发现的问题及时解决，实施明显和简单易行的废物削减方案。

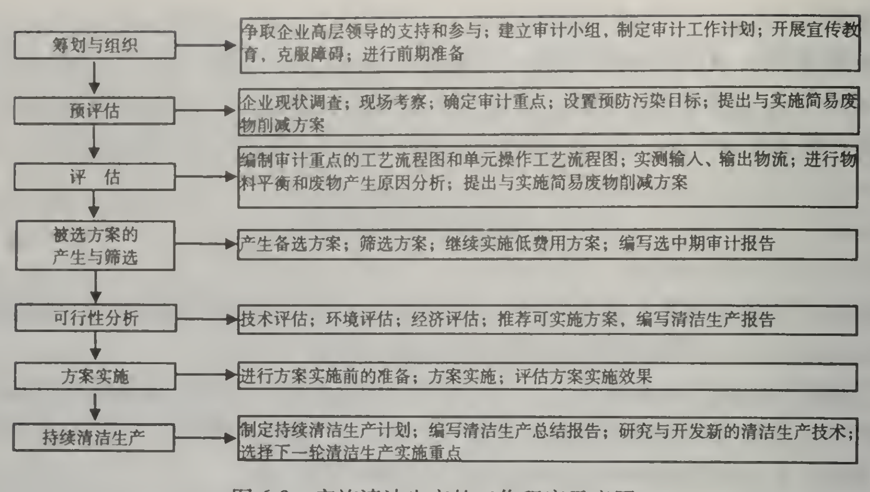


图 6-8　实施清洁生产的工作程序示意图

(3) 评估

评估工作是对已确定的审计重点的原材料、产品、生产技术、生产管理及废物进行评估，寻找生产工艺和设备、运行与维护管理和工艺过程控制等方面存在的问题，分析造成物料和能量流失、废物排放量过多的生产环节及其产生原因。通过对审计重点的物料与能量衡算，建立物料平衡，是评估工作的重要内容。在评估工作的同时也将实施一些已经发现的简便易行的削减废物方案。

(4) 备选方案的产生和筛选

本阶段的任务是根据评估阶段的结果，制定审计重点的污染控制备选方案，并对其进行初步筛选，确定出多个备选方案。对不需要投入或少量投入可以解决问题的方案应立即实施。

(5) 可行性分析

对筛选出来的备选方案进行技术评估、环境评估，再进行经济评估。并分析对比各方案的可行性，推荐可供实施的方案。

(6) 方案实施

对确定可行的清洁生产方案付诸实施。制定详尽的实施时间表，克服实施过程中的各种障碍，并及时评价方案的效果。评价的内容同样包括技术、环境和经济三方面。

(7) 持续清洁生产

清洁生产是一个相对的概念，是永无止境的，企业不可能通过一个审计过程，就解决发现的所有问题。为了达到更高的清洁生产水平，需要继续实施清洁生产审计。这样的工作过程可以不间断地持续下去。同时对于一些已被实践证明确有成效的管理措施和生产、操作方式应作为规章制度定下来，坚持下去。对于一些需要较高投入和较长时间才能实施完成的方案要创造条件，制定分步骤的实施计划，尽快予以实施。在新的基础上不断研究开发预防污染的新技术，不断对企业职工进行清洁生产的培训和教育。

七、不同行业清洁生产的机会和审计

清洁生产战略现在已经在世界范围内被广泛认同，工业企业实施清洁生产已取得了显著的经济效益和良好的生态环境效益。清洁生产在物质转化中能提高物料、能源利用率、最大限度地减少废物的产生和排放、降低生产活动对资源和环境造成的风险，是有效控制污染的新途径，也是实现资源、环境与经济协调、持续发展的重要措施。因此，清洁生产不仅适合用于工业生产领域，也已在许多行业实施。

(一) 农业清洁生产的机会和内容

农业清洁生产是指将整体预防农业生态系统内部和外部污染的环境策略程序应用于农业生产过程和农产品生产中，将可持续发展战略变为可操作的具体措施，达到减少农业生产直接和间接对人类和环境的风险，保护资源和维护农业生态的安全性，实现农业经济、农村社会和生态环境的协调、持续发展的目的。

农业清洁生产的目标就是在农业生产活动的全过程中，采用绿色技术、清洁生产技术、生态工程技术和环境保护技术，遵循自然生态规律，加强农业的科学管理措施，使用清洁的农业生产工艺与措施，因地制宜、合理利用土地资源和水资源，最大限度地利用光热资源，减少对化能的投入和依赖，节约稀缺资源和非再生资源，提高物料和能源的利用率，减少甚至消除废物和污染物的产生和排放，防止有毒有害物质进入农产品和食物中危害人类健康。

农业清洁生产的机会在农业生产活动过程中随时都可捕捉到，包括各项农业生产的各个环节，如种苗的选择、肥料的使用、外源物质处理、病虫害的防治、污水净化和灌溉、轮作、间作和立体种植等。工业企业清洁生产中的产品周期分析(life cycle analysis assessment，LCA)法对于获得农业清洁生产机会来说也是十分有效的。产品周期分析是研究工农业生产中资源、产品和废品的代谢规律和耦合机制，促进资源的有效利用和环境的正面影响的一种普遍使用的方法，是分析农业产品从诞生到消亡、从摇篮到坟墓的一种全过程监督管理的方法。产品周期分析能够把农业生态系统、市场经济、社会体制和环境保护加以整体分析，达到生产过程不断优化，综合效益持续提高的目的。

农业清洁生产审计的内容主要包括原料分析、能源消耗、污染产生和排放、产品加工、运输、销售、使用、再生及处置等(图 6-9)。

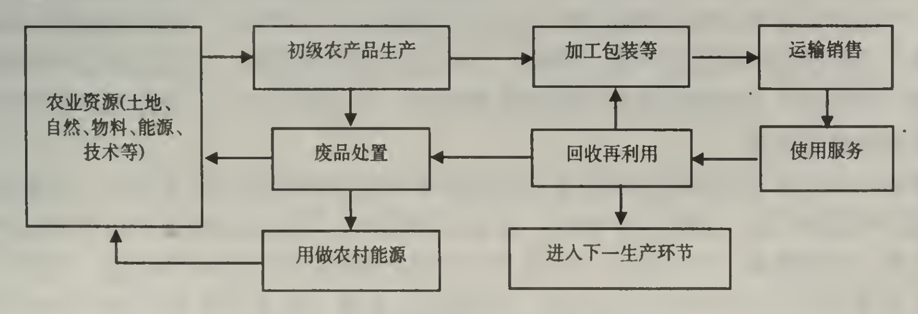


图 6-9　农业清洁生产主要环节和内容

（二）第三产业清洁生产的机会和内容

我国的第三产业在近 20 年有了长足的发展，随着产业结构调整的不断深入，第三产业大发展的春天已经到来，将有较大发展潜力的第三产业主要集中于旅游、商贸、餐饮和各种公用、信息、教育、科技、社区服务等，第三产业对环境的影响及环境管理引起世界关注，第三产业清洁生产势在必行。

第三产业的一些服务如旅游、高等教育、酒店、运输等对环境的影响既有直接的又有间接的，直接影响包括可能对周围水体、空气、土壤造成污染；间接影响是通过影响消费对象的思想、行为，从而影响当地的环境。从这个意义讲第三产业的清洁生产机会是与物流、交通流、资金流、技术流结伴而行。以旅游和餐饮业为例说明第三产业清洁生产的主要内容。

1) 旅游业清洁生产的内容。改进旅游产品生产设计(工艺品、生活用品等)和消除资源利用的缺陷(水、电、油、气、纸等)；实施生态旅游；减少或消除对环境的污染和破坏(废物、生活污水、垃圾、设施建设、噪声等)；制定旅游管理的规章制度和政策法规；开展清洁生产的宣传教育(绿色标志宣传、员工培训、媒介宣传、品牌和形象设计等)。

2) 餐饮业清洁生产的内容。全体职工树立绿色理念，对经营者进行培训，提高环保和节能的意识；改进原材料和能源使用的方式；食品和包装无公害化、保护生物多样性、减量循环利用、消除白色污染；废水、废渣、噪声、光电污染等的减量和科学处理处置；服务设施的绿色理念； 外环境的绿化美化和倡导绿色消费等。

八、清洁生产的可持续战略对策

清洁生产是兼顾经济效益和生态效益，最大限度地减少物料和能源的消耗，降低成本，提高效率；变有害的物料或产品为无毒无害，对生产全过程进行科学的改革与严格的管理，使生产过程中排放的污染物达到最小量；鼓励对环境无害化产品的需求和消费，对环境危害大大减轻。因此，清洁生产是实现资源可持续利用的最佳方式。它可在生产过程中控制大部分污染，减少工业污染的来源，从根本上解决环境污染与生态破坏问题，具有很高的生态效益。并且，清洁生产可在技术改造和产业结构调整中发挥重要作用， 能够创造出显著的经济效益。清洁生产对经济发展的巨大贡献体现在清洁生产技术、产品与设备等方面的国际贸易与合作日趋活跃，与清洁生产密切相关的环保产业已发展成为国民经济的支柱产业。因此，无论是从经济角度看，还是从社会与环境角度看，推行清洁生产是实施可持续发展的重要举措。目前清洁生产已成为世界各国实现可持续发展的必然选择。

清洁生产技术和可持续发展技术是环境科学和生态学的新兴分支学科，具体内涵和外延还没有完全界定。清洁生产技术、生态工程技术、可持续发展技术和环境保护技术相互交叉、相互重叠、相互渗透，形成了技术集群和环境污染预防的套餐。因此，清洁生产不只是单一技术所能进行的工作，随着社会发展、科学技术进步和产业部门的演变，清洁生产的内涵也在不断改变，清洁生产的高新技术容量也在不断扩展。清洁生产

是一个相对的概念，现在的“清洁”是与过去水平比较而言，不可能一劳永逸地完成清洁生产任务，它需要持续的完善过程。为了确保清洁生产持续健康发展，我们应该加大清洁生产的立法和管理，要围绕经济发展的实际不断调整清洁生产的目标，通过法律手段，规范行业行为，引导各种行业实施清洁生产，使经济活动与可持续发展的要求相适应；要高度重视清洁生产科学技术研究，加大技术研究和推广的资金、物质、人力投入，加强国际间及国内的清洁生产技术合作和信息交流，抓好清洁生产的示范工程，及时总结成功经验，以利推广；重视清洁生产的各类人才培养是清洁生产持续发展的基础，尤其是加大对清洁生产的普及教育，利用各种传媒手段(广播、电视、报纸等)宣传和普及清洁生产知识，提高职工素质，在企业或部门要培训一批清洁生产骨干和具备清洁生产素质的企业家。

第七章　旅游生态学

第一节　旅游生态学的产生与发展

旅游生态学(tourism ecology)是应用生态学的一个新型的分支学科。旅游生态学的产生有其深刻的社会、经济和文化背景。旅游生态学主要是针对传统大众旅游业所出现的生态环境问题而产生的，同时它又与人类的资源观和生态环境意识的不断深化密切相关。

一、旅游生态学产生的背景

(一) 人类资源观和生态环境意识的深化

1. 资源问题和环境问题的出现

当代社会的人口膨胀、资源稀缺、环境恶化、发展受阻，已成为全世界共同的危机。它们之间密切相关，具有连锁效应的特征。资源问题的实质是相对于人类需求而言的资源稀缺问题，环境问题的实质则在于人类对自然资源的不合理开发利用。而自然资源稀缺是随着人口数量、人类科学技术水平和生产力，以及人类生活质量等的发展而出现和变化的。如果说资源问题和环境问题在历史上早就已经出现，但毕竟是局部性的。而在当代社会除局部性问题更加恶化以外，人类又将面临全球性的困扰。我们随时随地都能够深深地感受资源和环境问题的痛苦。

(1) 资源问题

自然资源是人类生活和生产的物质基础，人类的生存离不开自然资源。人类社会的发展历史实质就是一部人类开发利用自然资源的历史。工业革命以前漫长的人类社会历史时期，人类活动对自然界的影响很小，自然界里的资源似乎取之不尽、用之不竭。那时人类对自然资源的影响是局部的、微小的。工业革命以来，人口数量迅速增长，科学技术和物质生活水平也在不断提高，相应地，人类对自然资源的压力也与日俱增，资源问题随之提升到了时代日程。在臭氧层破坏、土地退化、矿物燃料资源短缺、淡水资源短缺、森林锐减和物种灭绝等严重的资源问题面前，人类开始反思自己疯狂向大自然掠夺资源的历史。

(2) 环境问题

人类的生活、生产及一切活动都不能离开其周围的自然环境。自人类产生以来，自然环境便与人类同呼吸、共命运。随着人类社会的不断发展演变，人类周围的自然环境

也便经历了一个复杂的变化历程，相应地，环境问题也便从无到有、从小到大地发展起来。尤其是在工业革命以来，由于工业、农业、交通的现代化和城市人口的过度聚集，带来严重的环境问题，诸如空气污染、水污染、噪声污染和垃圾广布的现象，这些都使人们周围的生态环境逐步恶化。到 20 世纪初期，环境问题逐步深化，环境公害事件不断涌现和升格。环境公害是指由于人类活动而引起的环境污染和破坏，对公众的安全、健康、生命、财产和生活舒适性等造成的危害，它可以在短期内造成大量人群发病，甚至死亡。20 世纪较大的环境公害事件有：1930 年 12 月比利时发生的马斯河谷事件、1948 年 10 月美国宾夕法尼亚州发生的多诺拉事件、1952 年 12 月英国的伦敦烟雾事件、1953~1954 年日本的水俣病事件、1955~1972 年日本的疼痛病事件和 1968 年 3 月日本的米糠油事件。

2. 人类资源观和生态环境意识的发展

面对愈来愈严峻的资源问题和环境问题，人类开始反思自己的发展历程。1962 年美国海洋生物学家 Carson 所著的《寂静的春天》问世，标志着人类关心生态环境问题的开始。1968 年意大利咨询公司董事长粤来里欧·佩切依邀请 30 位知名学者组成罗马俱乐部，开始对人类长远经济发展面临的问题进行系统研究。1972 年 3 月罗马俱乐部公开发表美国未来学家丹尼斯·麦多斯等人研究人类困境的第一个报告——《增长的极限》。该报告通过研究世界人口增长、工业增长、环境污染、粮食生产和资源消耗之间的动态关系，提出了著名的“零增长”模式，认为人类不应以现在的生产方式继续下去，必须停止经济和技术的增长，才能使全球系统走向一个零度增长的均衡社会，人类才能持续生存下去。同年 6 月，联合国在瑞典首都斯德哥尔摩召开了由 114 个国家参加的第一次“人类与环境会议”，通过了著名的《人类环境宣言》，提出了“只有一个地球”的口号。自此，人类的生态环境意识大大向前推进了一步。1980 年世界自然保护联盟(IUCN)在其《世界保护战略》报告中最先提出“持续发展”(sustainable development)这个崭新的概念。1987 年第 42 届联合国大会上，以挪威首相布伦特兰夫人为主席的“世界环境与发展委员会”(WCED)公布了著名的《我们共同的未来》一书后，才在世界各国掀起了可持续发展的浪潮。1992 年 6 月，联合国在巴西里约热内卢召开的“环境与发展”大会上正式确立了“可持续发展”是当代人类发展的主题。可持续发展已经成为人类面向 21 世纪的共同选择。

(二) 传统大众旅游业的生态化

旅游作为一种社会现象，自古便有。只不过，在以往的奴隶社会、封建社会，旅游仅仅为少数的帝王将相们所享有。传统大众旅游业(也即近代旅游业)是社会经济发展的产物，它是指社会经济发展后，大众参与的一种旅游活动。1841 年英国 Thomas Cock 第一次组织包价旅游，掀开了近代旅游业的序幕。传统旅游业由于迎合了当时人们的需求，迅速在世界各国传播开来。特别是第二次世界大战以来，旅游业几乎在世界各地都取得了巨大的成功。

旅游业作为一种第三产业，不仅使人类获得精神上的享受，更重要的是它具有强大的经济效益。曾一时旅游业被封为“投资少、见效快、无污染的无烟工业”，吸引了大批旅游开发投资者的青睐。或许是因为旅游业带来经济繁荣的一面，掩盖了其对环境破坏的消极一面；或许是因为在相对一般工业而言，旅游业堪称“无烟工业”的偏颇思想的指导，致使旅游开发管理者从一开始就忽视了旅游环境问题。虽然也有不少的旅游法规条例都对保护旅游资源及环境有明确的规定，但似乎只是口号一般，真正实施并非易事。旅游开发管理者承袭了产业革命的管理思想和方法，其开发利用仍属掠夺式。传统大众旅游业走的其实仍是一条“先污染后治理”的发展路子。面对旅游区严重的生态环境问题，人类不得不开始质疑称为“无烟工业”的旅游业。

1. 旅游量猛增

自旅游业兴起以来，世界性的旅游需求迅速增长，同时伴随着大量的游客涌入旅游区。早在 20 世纪 80 年代，美国东部海岸十多个海滨浴场早已人满为患，致使扔到海里的垃圾太多，大风浪把这些垃圾推上海滩，海滩随之成为垃圾场，经营者不得不宣布临时关闭。在我国，1988 年 5 月 1 日游览泰山的游客达到 12 万人，致使许多旅游者食宿无着，一些旅游附属设施遭到损坏，少数游人甚至被挤伤。西岳华山也曾多次发生挤死挤伤人的事故。春天的杭州西湖，游人摩肩接踵，高峰时的游人密度超过合理密度 10 倍以上，仅有 30 多亩地的三潭印月景区，高峰月接待游人 70 多万人次，平均每天 2 万多人次，高峰日达 3 万多人次。一到旅游旺季，各个著名的旅游胜地的食宿与交通便告急，供给方面全面紧张。交通运输能力不足和管理不善，实际已经成为旅游业的瓶颈所在。游客量的猛增带来旅游超载(包括旅游资源超载和设施超载)，相应地产生旅游污染问题。有人把这一现象称之为“旅游摧毁旅游”。

2. 旅游资源的损坏

大量旅游者的涌人使旅游区超载，从而使旅游资源遭到一定的损坏。北京故宫三大殿内，现已无法重新制作的“金砖”，因大量游人的磨蚀，已经明显下凹。北京城内许多古建筑的石柱下段，因游人不停地抚摸和自然侵蚀，柱上的雕刻日渐模糊。甘肃敦煌的千佛洞，许多原本色彩鲜艳的壁画，也因游人呼出的二氧化碳作用而越来越暗淡。部分旅游者破坏性很大，所到之处，必动手随便刻画，大量文物古迹因之遭难，损失原有的风采，甚至被弄得面目全非。许多珍贵的人文旅游资源无法以价值来衡量。在以自然景观为背景的旅游地，由于没有统一的规划，许多设施仅仅为了解决游客过多的问题，但建筑的风格和建筑的布局与自然环境也极不协调，削弱了其吸引力。

3. 旅游地生态系统的失衡

旅游地的旅游资源、生态环境是一个协调统一的生态系统。旅游超载不仅使旅游地的水体、空气、植被、土壤等自然要素受到影响，而且也有损于整个景区的宁静度、整洁度和旅游氛围，从而使整个旅游系统发展失衡，物质流、能量流、信息流和价值流发生紊乱。不同类型和等级的旅游地，对其旅游资源和生态环境有着不同的标准。一旦超过指标值，即表明遭到污染。

在我国许多旅游地，水质已不同程度地受到污染。北戴河海水已受到轻度污染。不少山岳自然风光旅游地的水体污染和用水问题也越来越严重，黄山山上的厕所粪便和生活污水均直接排入附近溪中，污染了水源。1981 年有关部门对黄山观瀑楼的水质进行分析，细菌总数达 500 个/ml，超过国家规定的生活饮水水质标准(100 个细菌/ml)4 倍；大肠杆菌群达 230 个/L，超标(3 个/L)75 倍；职工宿舍区用水总数达 1500 个/ml，超标 14 倍。新开发的湘西武陵源，原来清澈见底的金鞭溪因上游设施中心区生活污水的污染，已日见混浊。对于自然风景旅游地来说，水是旅游地的生命，水质影响到旅游活动的开展和饮用者身体的健康，在我国大部分自然型旅游地，保护水源和水质已成为当前的迫切任务之一。

噪声污染和垃圾污染最容易被人感知。交通和游览线路设计的不合理，旅游地游人超载，旅游地四周有较多的噪声源，植被稀少等等，都可能是旅游地噪声污染的原因。游客超载导致景区内人声嘈杂，如闹市一般，游客体验不到应有的气氛。旅游地内垃圾污染也常成为较严重的问题，各种食品包装物散布旅游地。如果说北京颐和园每天产生的 3t 垃圾尚可集中处理，但公园管理人员对于香山满山遍野的废弃包装物则束手无策。

旅游业的失控发展——数量型增加和外延型的扩大，带来旅游区的环境破坏和污染。严重的现实问题已向那种盲目乐观的“旅游业是无烟工业”观点提出了挑战，旅游废物的处理并不亚于对传统工业废物的处理，旅游环境承载力加重的事实，必将导致景观的消亡和旅游区的毁灭。

二 、旅游生态学的形成与发展

在人类的资源观和生态环境意识不断深化的形势下，为解决传统大众旅游业所出现的生态环境问题，旅游生态学应运而生。旅游生态学的萌芽最早可以追溯到 20 世纪 70 年代。在世界旅游业较为发达的国家，由于旅游业的繁荣而最先给旅游区带来一些生态环境问题，在这一时期吸引了一大批学者开始探讨旅游活动对生态环境的影响，主要涉及游径、交通和植被的影响。针对旅游活动对资源和环境的负面影响，1980 年加拿大学者 Moulin 提出了“生态性旅游”(ecological tourism)的概念。生态性旅游被定义为：在满足保护的前提下，从事对环境和文化影响较小的游乐活动。这一概念提出以后，在旅游业较为发达的国家迅速得以应用，尽量开展对环境影响小的旅游活动。和传统大众旅游业相比，生态性旅游的最大特征是其“保护性”，它对旅游对象影响极小。基于生态性旅游之上，生态旅游(ecotourism)作为一种高品位的旅游产品在 20 世纪 80 年代随之产生。在一定意义上，生态旅游的产生是旅游生态学在旅游业中发展的一种必然。生态旅游是贯彻旅游生态学原理的一种新的旅游产品和旅游形式。

旅游生态学(tourism ecology)，有人译作游憩生态学(recreation ecology)(赵抱力 1990)。20 世纪 80 年代以来发展较快，其内容涉及旅游造成的生态破坏分析(Wood 1987，Brouwer 1988，Horsefall 1988，Cole 1989)、旅游景观格局对旅游者行为和心理的影响(Napier et al. 1986，Anon 1986，Axelsson-Lindgren et al. 1987，Kaplan et al. 1988，1989)、旅游生态负荷(Kuss et al. 1986，Snowman 1987)、旅游生态区划

与规划(Мчоненко и др. 1989)及从生态学角度开展旅游管理(Grove 1986, Frost 1988, Burch et al. 1988, Boo 1991, Fowkes 1991)。涉及的生态系统和景观类型很多，主要是海岸带、水体、森林等，尤其对海岸带非常关心。在研究方法方面应用了野外观测实验(Cole 1989)、模型预测(Dwyer 1988)、公众调查等。

我国近年来在旅游资源的开发利用(袁兴中 1993)、旅游容量(张崇岱等 1991, 保继刚 1987)、旅游景观的美学评价(俞孔坚 1991)、自然景观旅游生态系统的特点(卢云亭 1991)、旅游生态学的学科领域(刘鸿雁 1994)、旅游承载力(崔凤军 1995)、旅游目的地的可持续发展(吴必虎 1996)、旅游开发对植被景观的影响(程占红 2000)等方面做过一些工作，但对旅游生态学这一学科做系统研究的还较少。

旅游业的发展越来越快，旅游引起的生态环境问题也越来越明显地表现出来。生态环境的破坏必然使旅游业的发展受到影响，利用旅游生态学指导旅游业的实践十分需要。因此探索和发展旅游生态学显得非常迫切。

第二节 旅游生态学的研究内容和学科性质

旅游生态学是一门介于旅游科学和生态学之间的边缘学科，同时又是应用生态学的一门新兴的分支学科。它既具有综合性的特点，又具有实用性的特点，具有强大的生命力。它的产生和发展必将为旅游业的正确发展提供理论指导。

一、旅游生态学的研究对象和内容

旅游是在闲暇时间所从事的游憩活动的一部分，它是在一定的社会经济条件下产生的一种社会经济现象，是人类物质文化生活的一个部分，是一种人类体验，一种社会行为，一种产业，同时也是一种地理现象。旅游的一个显著特点是要离开居住或工作的地方，短暂地到一个目的地进行活动，同时，旅游目的地要提供各种旅游接待设施以满足其需要。旅游者从居住地经过旅游通道到达旅游目的地参观、游览再回到居住地这个过程是旅游的本质属性。生态学是研究生物与其环境相互关系的科学。因而旅游生态学是研究人类旅游过程与其周围环境相互关系的一门学科。也就是说，它研究的是旅游这一社会行为与其作用的旅游环境之间的相互关系，而旅游社会行为涉及旅游过程中与旅游业有关的所有主体，既包括旅游者，又包括旅游开发商、旅游经营者、管理者及从事各种旅游服务业的不同阶层的群体，还包括旅游社区的人们。旅游环境包括自然环境和社会环境。自然环境是指旅游地由各种自然要素诸如地质、地貌、土壤、水体、大气、植物、动物等组成的一个自然综合体，社会环境是指由旅游社区、旅游开发者所营造，旅游者所影响的一种旅游社会氛围环境。实质上，旅游生态学就是研究旅游过程中的主体与旅游环境相互关系的科学。

由旅游生态学的研究对象看来，旅游生态学的研究内容主要有以下方面：

1) 旅游与环境的相互关系；

2) 旅游环境承载力；

3) 旅游开发的设计，包括旅游线路、旅游区结构和功能的设计；

4) 旅游服务业的取向；

5) 旅游主体的权利和义务，包括旅游者、旅游开发管理者、旅游媒介和旅游社区的人们；

6) 旅游环境的保护和污染防治对策。

二、旅游生态学的学科性质

根据旅游生态学的研究对象和内容，旅游生态学同许多相邻学科有着密不可分、相互补充的联系。

1. 与旅游学科的关系

旅游生态学是介于生态学与旅游科学之间的边缘学科。旅游地理学、旅游经济学、 旅游心理学、旅游社会学、旅游管理学等，都是旅游生态学的平行姐妹学科，它们从不同的侧面来研究旅游活动这一复杂多面的社会行为。与这些平行学科比较，旅游生态学研究的特点是它的理论指导和实践应用性。

2. 与生态学科的关系

旅游生态学是生态学的一部分，它属于应用生态学的一个分支，同时与理论生态学也密切相关，两者都是这门学科得以形成和发展的前提。

3. 与其他学科的关系

旅游活动涉及的内容极其广泛。旅游生态学的研究要涉及很多其他学科的知识，如环境学、经济学、管理学、社会学、美学、心理学、建筑学、交通运输学等等。要研究好旅游生态学，必须掌握这些学科中与旅游有关的基本知识。

第三节　旅游与环境

一、旅游与环境的关系

良好的环境对旅游的产生和发展起着重要的推动作用。旅游与环境之间存在着三种关系。

1) 独立关系。旅游和环境保护各自发展，互相没有接触和干扰，保持独立。这种情况一般不会持续太长时间，随着旅游大规模发展，环境将会产生深刻变化。

2) 共生关系。旅游和环境保护，相互支持，彼此受益。从环境保护学家的观点来看，环境特征和条件保存得越接近原生状态越好，与此同时，良好的环境给旅游者提供了游览内容。但是，世界上能达到这种关系的地方不多。

3) 冲突关系。当旅游对环境产生有害影响时，旅游与环境就发生冲突。在某些情况下，旅游与环境的冲突关系会刺激和促进旅游目的地采取措施，以保护脆弱的生态系统。但常常待人们意识到要保护环境时，损害已经到了难以挽救的程度。

二、旅游与环境的共生关系

环境是旅游业的基础，旅游如果要成功和持久，需要对目的地的风光和历史遗产进行保护。保护重要的旅游资源也就是对潜在的旅游业投资，保护的目的也就是尽量维持旅游与环境的共生关系。可以说，在缺乏良好环境的地方基本难以开展旅游。

一般而言，旅游与环境的共生关系是由下列因素促成的：① 工业和贸易的发展及它们相互联系产生的不良后果，刺激了人们对于公园和野外空间的需求。因此，保护环境，建立公园、自然保护区被看做是医治城市病的良药和逃避日常枯燥、单调、紧张工作及城市生活的良方。② 人类可利用的自然资源是有限的，对资源，特别是对不可再生资源的利用，要强调其有效性，其原则是最大的利用程度和可能造成的最小的环境退化。③ 在旅游活动行为层次中，绝大多数旅游者主要活动是观光，观光极大地依赖于自然环境的质量。④ 环境保护在生态科学方面得到了重视，保持人与环境的协调对人类的进步与发展非常重要。其结果是，人类能自觉地对未经系统规划的自然环境的开发利用进行严格控制。⑤ 自然环境、人类遗址、历史遗迹的保护已使旅游业得到了经济效益。

旅游不仅通过其自身的活动促进、刺激环境保护，同时直接提供经济手段使保护措施得以实施。区域旅游经济收入的一部分可用来投资与维护风景区的环境质量和保护历史遗迹。旅游在多大程度上保护了环境，这难于确定，有一些保护措施在大规模的旅游出现前就已经有了。但在一些发展中国家和地区，可以明确地看到，旅游对环境保护起了非常重要的刺激促进作用。

旅游对环境的保护有四种形式：① 旅游促进了历史遗迹、古建筑、纪念馆的修复。如武汉重修黄鹤楼、南昌修复腾王阁、福建湄州岛修复妈祖祖庙天后宫、广州修复南海神庙(菠萝庙)都归因于旅游。② 旅游促进一些旧的建筑改造为新的旅游设施。北京大量的人防工程随着旅游业发展改造为旅馆，福建客家土楼改造成高级宾馆，傣族的竹楼、苗族的吊脚楼接待游人后赋予了新的内容。③ 旅游对自然资源的保护提供了推动力。如坦桑尼亚 1961 年独立后，世界上很多专家估计在没有欧洲的控制之下，非洲的野生动物将受到摧残。今天看来这样的担心是多余的。相反，坦桑尼亚和其他东非国家的国家公园数量大大增加了。政府逐渐认识到，发展旅游可以赚取外汇，而发展旅游必须保护吸引旅游者的旅游资源，对于非洲来讲，特别是要保护好野生动物，到 20 世纪 80 年代初，东非和南非已建立了 20.72 万 km^2 的国家公园，是世界上庇护野生动物数量最多的地区之一。④ 为了保持环境质量和保证向旅游者提供满意的体验，旅游使采取行政的和规划的控制成为可能。但令人遗憾的是措施往往是在失控和过度利用造成旅游资源的退化之后才采取的。

三、旅游对自然环境的影响

毫无疑问，旅游者和旅游开发者对旅游区生态系统会造成一定的影响，这一点已为人们所共识，并引起了研究人员的注意。无论是观察野生动物、捕获猎物等主动游憩，还是欣赏风景、游山玩水、观赏植物等被动游憩，或者是资源开发经营者、土地

拥有者及旅行社的活动，对生态系统都会产生一定程度的干扰破坏。自然和半自然的生态系统的游憩性利用，都会对各自然要素产生一定的影响。

（一）旅 游 与 植 物

植物是很多旅游目的地主要的旅游资源之一。不同的旅游活动对植物产生不同的影响，主要包括：① 对鲜花、苗木和真菌的采集，会引起物种组成的变化。② 森林火灾可能因旅游者用火不慎而引起。③ 因为旅游活动的开展而任意砍伐树木，毁坏了大量的幼木和林地，改变了森林的树龄结构，降低了森林覆盖率，同时引起水土流失、景观破坏等问题。④ 大量的垃圾堆放，会导致土壤营养状态的改变，还会阻塞空气和光线，使生态系统受到损害。⑤ 步行旅游者和汽车交通直接对植物产生影响，当利用强度超过生态系统的容量时，就会对植物产生不利的影响。

旅游活动对植物产生的影响，对植被覆盖率的最大损害发生在开发初期。随着不断开发，旅游者增多，物种的多样性会下降，抗性弱的物种消失，抗性强的物种生存下来，同时其他抗性强的物种会被引人。旅游对不同的生态系统的影响差异巨大，如草原生态系统，由于抗性强的物种所占比例很大，因此旅游对其物种退化的影响很小。

旅游踩踏是植物损坏的最主要的原因。因游人和机器的重量及移动产生的对土地的踩压，大量游客在风景区的聚集，对土壤和植被造成广泛而不雅观的损害。植被和土壤与游人密度之间存在的反馈关系，说明了环境与游憩间的联系。不同的植物群落，具有不同的敏感性。研究表明，在温带地区，不同的植物群落对踩踏的承受能力是不一样的。在给定的强度下，踩踏对路旁植物的破坏性，森林地带大于草地。林线以上的高山草甸对人为踩踏的耐力很小，而这里的花草却是吸引游人的主要魅力所在。另一方面，某些草地和莎草科植物对游人的踩踏耐力却非常之强。

游人踩踏植物和其他方式的破坏，使植物发生直接和通过土壤表现出的间接变化：① 植被稀少的面积增加；② 植物高度降低；③ 草地密度减少；④ 植物多样性减少；⑤ 踩踏使物种结构改变，即正常种属被耐磨踩物种替代，同时游客的采集花朵、枝叶、真菌等行为也会改变物种的结构；⑥ 为野营目的砍伐幼树改变了植物群落的年龄结构。有时旅游者还无意将一些外来种带入旅游区，从而改变旅游区内植物区系的组成，甚至带来一些灾难性的后果。研究还表明，随着旅游植被景观的敏感水平的增加，其群落景观重要值和物种多样性信息指数在不断下降，伴人植物却相对地增多。在旅游区，由于旅游开发者管理水平的差异，近景区、中景区和远景区的各指标也有着不同的变化规律。

（二）旅游与土壤

大量游客进入旅游目的地，无疑增加了对土壤的踩压。旅游对土壤主要有四方面的影响：① 随着植物的消失，土壤裸露面积增加；② 随着压力增加，土壤板结程度增加，水分渗透减少，增加地面径流，导致水土流失增加；③ 土壤 pH 值增加(可能因植

物减少、板结增加造成)；④ 因土壤压实，土壤厚度减低；⑤ 土壤的紧实度将影响植物生长和植物的树龄结构。

(三) 旅游与水

以水为资源基础开展诸如游泳、钓鱼、划船等旅游活动的目的地，高质量的水是基础保证。如果大量污染物进入水体，对环境和经济都将产生危害。旅游对水的影响主要有下述几点：① 大量的未经适当处理的生活污水进入海滩、湖泊、河流等水环境，对使用这些资源的旅游者的健康是一个潜在的危害。② 过多的营养物质进入水体将加剧富营养化的过程。过量的杂草生长将影响水中溶解氧的含量，反过来，溶解氧含量的变化将制约鱼的数量、种类和生长速度。③ 氧的供给和分布变化对水生动植物产生影响。水体中不断增加的油物质，已经对氧的供给产生严重危害，同时降低了旅游者在这些水体中游玩的满意程度。④ 汽油会增加湖泊和河流的危害程度，也将导致对水生动植物的危害。汽油中含有的铅化合物在水底沉积物中积累会对某些生物产生危害。

(四) 旅游与大气

旅游意味着要利用汽车、轮船、火车、飞机等。所有这些交通方式都对大气产生污染，城市大气污染的一部分是由旅游车辆造成的，旅游目的地由汽车排污造成的大气污染非常严重。这方面的研究工作做得很少。

(五) 旅游与野生动物

打猎、观看和对野生动物拍照是很重要的旅游活动。观看质量的高低对旅游者的满意程度影响很大。在自然环境中观看未被人为干扰的野生动物获得的享受要远远高于在城市动物园中的体验。这种希望尽可能在自然状况下观看野生动物的欲望，使大量的旅游者集中到有限的野生动物丰富的地区。环境问题也就在这种情况下发生了。

由于缺乏旅游活动开展之前野生动物的数据，以及缺乏迁徙和死亡野生动物的数据，旅游活动对野生动物影响的度量是模糊的。从旅游角度对野生动物进行研究有下述三个特点：① 旅游对野生动物影响的研究工作集中在大哺乳动物和鸟类，而对较小的哺乳动物、爬行类动物和昆虫的注意较少；② 研究的空间尺度较大；③ 由于缺乏能确定和预测旅游对野生动物影响的生态学基础，大部分的研究是描述性的。

旅游对野生动物的影响可以分为直接影响和间接影响两类。① 旅游对野生动物的直接影响。野生动物能承受旅游活动强度的能力在各个区域、对各种动物都不一样。旅游活动对野生动物造成的直接影响有几个方面：第一，野生动物的捕食和繁衍规律被破坏；第二，不加选择地狩猎和钓鱼使野生动物数量下降；第三，食肉动物与被食肉动物之间的关系被破坏。② 旅游对野生动物的间接影响。建立国家公园和自然保护区有益于某些动物的繁殖，但也会使某些动物过量繁殖，从而刺激争夺食物的“战争”，这对

弱小的动物将会产生致命的打击。此外，旅游者对购买动物纪念品的愿望和本地居民急于赚钱的欲望，导致大量野生动物被猎杀。

旅游、野生动物和本地居民三者之间有着一个复杂的关系。人口增长需要扩大耕地、放牧面积，保护野生动物也需要大量的土地。人口增长和农业土地供给不足的双重压力导致了野生动物保护和本地居民需要之间的冲突，而旅游处于野生动物保护和本地居民需要的冲突之间。如何协调三者之间的关系，其关键在于在保护野生动物、开展旅游活动的同时，要给不断增长的人口提供土地、食物和就业机会。

(六) 旅游与地质

在大多数地区，旅游对地质的影响很小。旅游对地质的影响局限于对一些独特地质景观的破坏，如钟乳石、石笋被破坏、珊瑚礁被挖走等等。

旅游活动对自然环境各要素影响的内部关系如图 7-1 所示。

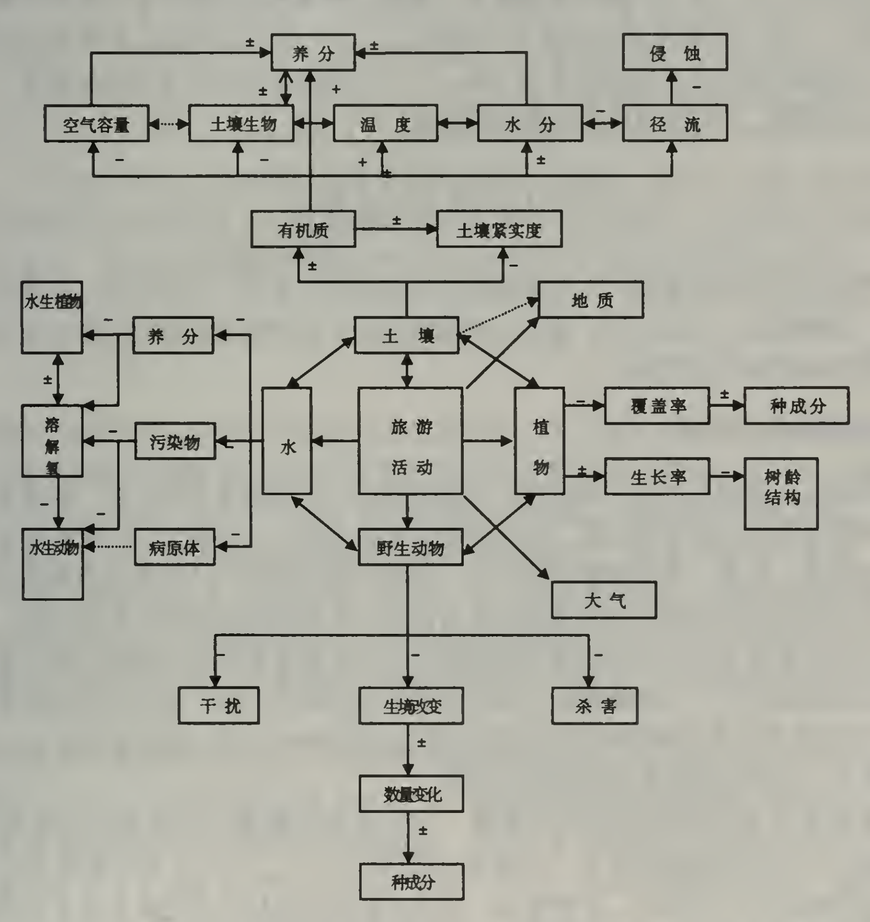


图 7-1　旅游活动对自然环境影响的内部关系(转引自保继刚等　1993)

+有利影响；-不利影响；----不确定影响

四、旅游对人文环境的影响

(一) 旅游对风景区的影响

旅游对风景区的影响表现较多。① 建筑污染。风景区内旅馆、餐厅和娱乐等接待游客的各种设施常以其不同的形态结构出现。其建筑特点往往不能与自然美有机地融为一体，这就产生了建筑污染。这种污染是由于建筑风格、体量、色彩与环境不协调造成的。② 带状发展和蔓延。海滨风景区，特别是那些缺乏规划控制的地方，其基础设施往往沿海岸线蔓延，以图方便地利用海滩。在内地，带状发展也会沿着山谷和风景路线出现。③ 基础设施超负荷。每到旅游旺季，很多风景区的基础设施不能满足游人的需要，超负荷的结果是造成混乱、污染和旅游者、服务员工健康受损。④ 交通堵塞是景区的一个严重现象。主要有三种形式：第一，不同的交通方式互为障碍，特别是步行者和汽车的冲突严重；第二，景区某些景点、地段，特别是入口处和中心地段交通往往超负荷；第三，停车场地的供给和需求不相符合。这一方面由于缺乏旅游规划的统一指导，不同的旅游者对停车场的需求不一样，另一方面由于景区土地利用的紧张，停车场所需的成本较高，从而造成供求关系的不平衡。

(二) 旅游与社区居民

旅游对社区的社会影响，主要体现在社区居民的价值观、个人行为、家庭关系、生活方式、道德观念、社会分层、语言、健康等方面。这些影响都是社区居民通过与游客的直接或间接接触所感受到的。

1. 社区居民态度的变化

旅游业是一种朝阳产业，具有很大的经济效益。在旅游业发展之初，社区居民对蜂拥而至的游客表现出欢迎的态度，给予各种形式的支持，这是因为开发旅游业会带来可观的经济利益。然而，随着旅游业的发展，游客数量的增加，社区居民的热情会逐渐降低。这一方面因为社区居民不希望他们原有的社会风尚因旅游业的发展而衰退，但旅游活动总是不可避免地对社区的传统习俗和生活方式产生或多或少的冲击；另一方面，每当旅游旺季到来之时，大批旅游者的涌现使社区变得拥挤不堪，给社区居民带来很大不便， 他们不得不忍受那种拥挤并分担旅游者造成的各种不便。旅游者享受的一些特殊设施和服务，也会引起社区居民的强烈不满。

随着旅游所造成的社会变化的加剧，当这些变化超越了社区居民的容忍程度之时， 对旅游的憎畏感(即对陌生人的畏惧)也便继之产生。它一方面可能因为市场、公路、商店等旅游设施的拥挤，会慢慢地、持续不断地引起社区居民越来越多的抱怨；另一方面可能是因为社区居民因不能掌握自身命运的失落感所引起。家庭结构、生活节奏、与其他居民的关系、甚至连体育锻炼的轻松感等方面的变化，都使他们省悟到，他们不再像他们想象的那样“自由”，那样“重要”了。为了应付越来越多的规划工作和

分区而治的需要，为了管理土地销售和工业扩展，为了利用新的税收的好处，地方政府官员的人数就会增加，形成更大规模的政府机构，从而导致个人自由的进一步丧失。

2. 旅游的示范效应

旅游者以其自身的意识形态和生活方式介入旅游地社会之中，引起社区居民的思想变化，产生各种影响，这种作用称为示范效应。示范效应是旅游对社会发生影响的主要途径。

旅游者不仅给旅游区带来了金钱，而且还可能带来诱惑强烈、触目可见的“消费者”的生活方式和文化。食品、饮料、地方文化、当地服务业、纪念品及其他向游客出售的商业享受，会在当地居民中间，树立起比传统生活水准更高的物质享受的风气。示范效应的表现形式，可以各种各样的面貌出现。

示范效应既有积极的作用，也有消极的影响。旅游社区居民通过模仿和学习，其行为举止、卫生习惯、经商意识都可以得到改善和提高，从而使为交换而生产，以及因此而来的生产方式的变革成为可能。示范效应也有可能产生所谓边际人的社会混血儿现象。所谓边际人，是指接受并力求推进旅游者的价值观和生活方式的当地居民，他们常常并不能如愿以偿，但由于他们的尝试，他们常被其同胞视为当地价值观的“叛逆者”。他们变成处于两种文化之间的人，并生活在两种文化的边际。造就了边际人的外来影响，也可能会带来，或被感应为带来某些其他社会问题。例如，卖淫、赌博、酗酒及吸毒等现象的出现或增多，可能是随着旅游者的到来而出现的。研究表明，旅游人数的变化与谋杀、强奸及其他暴力犯罪事件的变化之间，存在着强烈的相关关系。

（三）旅游与社会分层

旅游的发展可能会引起社会集团间关系的变化。在不发达国家里，新兴的旅游业会给该国带来新的职业和财富，使各职业集群的就业人数和就业类型，及其收入来源都有所变化。这些现象反过来进一步改变了各种职业、各收入社会阶层的形成基础。

社区的经济和社会结构也因旅游业的影响而发生变化。随着旅游业的发展，旅游行业成为当地人提高生活水平的途径。社区人们，尤其是年轻人开始向社会的上层靠拢，从而使当地人中出现贫富差别，这种差别清楚地反映出各人对旅游业的参与程度。这种变化使社区出现了以旅游业为基础的新的社会阶层，并对社区的政治力量产生影响。

示范效应和社会秩序的改变，导致了明显的消费现象。人们不再在家庭和亲友关系中，或通过与自己同一职业的其他人的合作，来追求社会认同和地位。他们相互竞争的焦点，变成看谁能获得越来越多的物质利益。青年人容易接受由旅游带来的新的价值观念，而家庭中的老年成员多仍坚守旧的传统观念不放，这时代沟就会出现。有时候，在旅游带动的经济中，家庭企业变得越来越赚钱，或家庭遗产(尤其是不动产)价值升高，这时同胞相争的事就会增多。随着妇女在家庭之外找到工作，尤其是第一次找到工作时，家庭生活和夫妇关系就必须做出调整。这些变化的长期走向，取决于个人和社会

的价值观。不管是变化的发生，还是对变化的理解，都不是一蹴即就的事。

(四) 旅游与文化复兴

成群结队的游客来到异国他乡，并不意味着必然对社区人们的尊严造成损伤。通过建立和再现对他们自己历史的骄傲感，社区人们也可以对旅游者施加影响。旅游者对当地文化的欣赏，以及当地人对保持当地地方特色的需要，刺激了当地纯真的手工艺品、文学、舞蹈、音乐、戏剧、礼仪、风味食品、服饰等的复兴。

文化的复兴，也会导致对纪念建筑物、普通建筑物的修葺，以及对重要景观的保护。如果不是为了旅游者的观赏，这些景观也许就在默默无闻当中逐渐湮没了。由于游客光顾，逐渐增多的使用使设施损耗加剧，使人们很快认识到问题的存在，并很快采取相应的应对措施。

五、旅游与环境的案例分析

(一) 旅游与自然环境的案例分析——天龙山旅游开发对植被的影响

植被是一定地域各种自然要素相互作用的最直接表现。它能充分客观地反映其生态环境。在以自然景观为主的旅游区，植被无疑是其重要的风景资源，发挥着不可替代的作用。良好的植被群落是旅游区得以协调发展的物质基础。近年来，由于旅游活动的进行，旅游区的自然环境不可避免地出现一定程度的波动干扰，从而大大减弱了植被景观的美学效益，形成视觉污染。

1. 天龙山植被特点与旅游概况

天龙山，又名方山，是吕梁山脉的分支，位于山西省太原市西南 36 km 处。该山海拔 1700 m，位于北纬 37°43′，东经 112°29′，基本上是南北走向，从北向南地势逐渐降低。该区属于温带大陆性气候，地带性植被属温带夏绿阔叶林，垂直变化不太显著，植物区系成分以温带地理成分为主。

天龙山融自然景观与人文景观于一体，以佛教石窟闻名于世。漫山阁、圣寿寺和天龙瀑布是其拳头景点。圣寿寺是其旅游中心区，附近集中了 100 余家旅游商业网点，从商者 500 余人。天龙山庄是其惟一的一座高级宾馆，于 1993 年建成并营业。天龙山松柏常青，峰峦叠嶂，泉水淙淙。山西省于 1993 年成立天龙山自然保护区，面积达 2067 hm^2，以保护森林植被为主，同时进行旅游开发建设。自此游客量迅速增加，年接待游客量约 20 万人次。

2. 研究方法

(1) 样地选择

根据距离带和敏感水平的不同，我们把整个游览区分为近景区和中景区(近景区指

以圣寿寺为中心，半径为 200 m 的圆周范围；其他区域则为中景区)；非游览区为远景区。1998 年在游览区选 5 个样地，样地面积 10 m×20 m，先测量每个样地的海拔高度、坡度、坡向和附近景点的游览人次及游径宽度(为便于比较，我们选择的各样地坡向基本保持西南坡)，再测量每个样地植被层的盖度及每个种的盖度和高度，乔木层还包括每个种的株数和冠幅，最后记录垃圾种类和数量、折枝损坏数量及枯枝落叶层和腐殖层厚度。通过分析以上五项指标的内在联系，以探讨旅游对植被影响的规律。另外，用同样的方法，在非游览区选 5 个样地，样地面积 10 m×20 m，分析比较游览区和非游览区的植被差异，寻找其中原因。

(2) *分析方法*

根据美国风景资源管理(VRM)系统的标准和评价方法，利用物质生态环境质量和景区质量管理相一致的观点，评价旅游开发对植被的影响。

物质生态环境质量是以风景林景观和群落结构的稳定程度为尺度，评价指标为敏感水平、群落景观重要值和物种多样性信息指数。景区质量管理是以视觉质量和植被保护程度为尺度，评价指标为旅游影响系数和伴人植物的多寡。这些评价指标的含义和计算如下：

敏感水平(sensitive level，SL)：是指公众和社会对风景景色的关注，其值采用游览频率。即：SL = 某景点游览人次 / 进入游览区总人次。

群落景观重要值(landscape important value，LIV)：是以物种多样化、群落结构和美学因素来反映植物群落的旅游价值和环境质量。群落景观重要值越大，说明该群落的旅游价值越大，其生态环境越好。其计算方法为：LIV = $X_W + X_H + X_E$，式中 LIV 为景观重要值；X_W 为相对物种系数=样地中种数 / 景区总种数(根据调查记录共 80 种)；X_H 为相对林高系数=样地平均林高 / 最高林高；X_E 为乔木相对冠幅系数=乔木平均冠幅 / 最大冠幅。

物种多样性信息指数(information index of diversity，H')：表示物种的丰富程度和各物种组成的均匀性程度。一般而言，信息指数愈大，表明物种多样性愈大，生态环境质量愈好。其计算公式是：

$$H' = -\Sigma\ (P_i \ln P_i)$$

式中：i=1，2，…，s 为物种总数；P_i 为第 i 个种的盖度比例，$P_i = N_i / N_0$，N_i 为第 i 个种的盖度，N_0 为第 i 个种相应植被层的盖度。

旅游影响系数(tourism impacting index，TII)：是反映旅游活动造成的植被干扰状况和景区管理水平。这里主要指人为影响，不计自然影响。因为景区管理已使自然影响降到最低程度，景区植被已受到保护管理。旅游影响系数越大，说明其受影响愈大，管理质量愈差。旅游影响主要包括垃圾、践踏、折枝损坏现象等。其计算方式采用半定量的分级赋值方式进行。即

$$\mathrm{TII} = C_d + C_s + C_t + C_v$$

式中：TII 为旅游影响系数，评价共分五级：0~0.9 为优，1.0~1.9 为良，2.0~2.4 为中，2.5~2.9 为中下，≥3.0 为差；C_d 和 C_s 分别为垃圾和折枝损坏现象的影响系数；C_t 为践踏影响系数，利用枯枝落叶层和腐殖层的厚度来说明践踏程度，厚度愈大，影响程度愈

小；C_v 为植被现状系数(两级间适当浮动)。旅游影响赋值见表 7-1。

伴人植物比例(proportion of plant companying with man-made activity)：指伴人植物在样地中所占的比例。比例愈大，人为活动影响愈强。

表 7-1　旅游影响赋值

垃圾		枯枝落叶层和腐殖层		折枝损坏现象		植被现状	
指标	赋值	指标	赋值	指标	赋值	标准	赋值
0	0	0	1.0	0	0	植物种类、构造和形态上有趣且富于变化，层次分明，林分成熟，乔木密度占绝对优势	0
1~30	0.2	1~3	0.8	1~5	0.2		
31~60	0.4	4~6	0.6	6~10	0.4	层次分明，植物种类和形态有趣，稍富于变化，乔木密度稍占优势，但灌木草本数量大增	0.3
61~90	0.6	7~9	0.4	11~15	0.6		
91~120	0.8	10~12	0.2	16~20	0.8	层次基本分明，有某些植物种类的变化，灌木草本密度大大增强，有少量人为植物出现	0.5
>120	1.0	>12	0	>20	1.0	缺少或没有植物的变化或对照，伴生有大量的人为植物	1.0

3. 结果分析

(1) 生态环境质量评价

表 7-2 和表 7-3 分别是游览区和非游览区植被现状评价分析结果，表 7-4 是旅游影响系数。

由表 7-2 可知，敏感水平基本上是近景区大于中景区，即 $Q_1>Q_4>Q_2>Q_3>Q_5$，说明近景区游览频率高，旅游活动远大于中景区。Q_4 之所以高，是因为漫山阁是其拳头景点，吸引了大量游客。天龙瀑布同样是其拳头景点，但因有两条游径可达该景点，因而 Q_3 的敏感水平值较低。

群落景观重要值的排序是 $Q_5>Q_3>Q_4>Q_2>Q_1$，说明中景区植物群落的旅游价值大，其生态环境质量好于近景区。再比较 X_w，X_H 和 X_E 可知，虽然 Q_5 的海拔高度和坡度远大于 Q_1 和 Q_2，即 Q_5 的自然生境条件比 Q_1 和 Q_2 差，但 Q_5 的三个系数值明显大于 Q_1 和 Q_2 的三系数值。从中说明旅游活动对植被影响的严重性。Q_3 的景观重要值之所以高，是因为有两条游径可达天龙瀑布，另一条游径分散客流，因而人为影响较小；同时位于溪流附近，海拔最低，坡度较缓，各种生境条件优越。

因乔木层在植物群落中起主要作用，物种多样性信息指数分析以乔木层为主，灌木层草本层作为参考。乔木层信息指数排序为 $Q_4>Q_5>Q_3>Q_2>Q_1$，即中景区信息指数大于近景区，中景区物种多样性大，旅游活动破坏性小，生态环境良好。

此外，游径宽度在植被影响中也起着显著作用，与上述三要素密切相关。游径愈宽，说明其附近景点的敏感水平高，群落景观重要值和乔木层信息指数愈小。

由此可知，敏感水平与群落景观重要值和信息指数基本上成反比关系。敏感水平高的景点，其群落景观重要值小，信息指数也较小。近景区一方面作为游客集散活动中

表 7-2 游览区植被现状评价分析

距离带	样地	旅游路线	海拔高度	坡度	路宽	敏感水平	物种量	风景林群落结构						信息指数			阴生种比值	伴人植物比值
								平均林高	平均冠幅	相对物种系数	相对林高系数	相对冠幅系数	景观重要值	乔木层	灌木层	草本层		
近景区	Q_1	圣寿寺附近	1550	20	4	0.95	19	4.38	2.17	0.24	0.29	0.36	0.92	0.22	0.65	1.76	0.05	0.26
	Q_2	圣寿寺-观音塔	1545	15	3	0.82	15	5.10	2.45	0.19	0.34	0.41	0.94	0.52	1.85	1.10	0.13	0.07
中景区	Q_3	圣寿寺-天龙瀑布	1500	10	1	0.75	18	8.21	2.98	0.23	0.55	0.50	1.28	0.75	1.27	1.05	0.28	0.06
	Q_4	尼姑坟-漫山阁	1650	5	3	0.87	19	7.63	2.57	0.24	0.51	0.43	1.18	0.87	0.97	1.26	0.21	0.11
	Q_5	白龙洞-高欢避暑亭	1700	30	2	0.74	22	11.76	2.78	0.28	0.78	0.46	1.52	0.79	1.87	1.80	0.23	0

表 7-3 非游览区植被现状评价分析

样地	海拔高度	坡度	坡向	路宽	敏感水平	风景林群落结构							信息指数			阴生种	
						物种量	平均林高	平均冠幅	相对物种系数	相对林高系数	相对冠幅系数	景观重要值	乔木层	灌木层	草本层	总种数	比例值
Q_6	1650	20	SE	0	0	19	6.30	2.65	0.24	0.42	0.44	1.10	0.16	1.15	1.16	5	0.26
Q_7	1650	25	E	0	0	20	5.50	2.63	0.25	0.37	0.44	1.06	0.39	1.46	1.52	4	0.20
Q_8	1550	5	E	0	0	20	6.25	2.95	0.25	0.42	0.49	1.16	0.58	1.78	0.95	5	0.25
Q_9	1550	20	NW	0	0	13	6.50	2.75	0.16	0.43	0.46	1.05	0.50	0.97	0.96	2	0.15
Q_{10}	1550	10	NE	0	0	17	6.25	2.70	0.21	0.42	0.45	1.08	0.60	1.19	1.10	3	0.18

心，另一方面又是旅游商业中心，人为活动影响强烈，各种污染源较多，污染物得不到及时处理与输出，因而植被景观较差。中景区某些景点的植被景观之所以也较差，这与其吸引力和游径选择密切相关。这一结论与实际状况基本相符，说明分析方法是可行的。

游览区与非游览区对比：游览区内的 5 个样地与非游览区的 5 个样地，海拔高度和坡度基本相似，具有可比性。非游览区 5 个样地的景观重要值均大于近景区，而小于中景区，说明非游览区的群落生态环境优于近景区，劣于中景区。非游览区除 Q_6 和 Q_7 外，Q_8、Q_9 和 Q_{10} 的乔木层信息指数值介于近景区和中景区之间，即其物种多样性高于近景区，低于中景区。从阴生种所占比例来看，非游览区同样也处于近景区和中景区之间，这又进一步说明非游览区的生态环境介于近景区和中景区之间。

其次，通过仔细分析近景区、中景区和非游览区植物群落结构，对比物种量、平均林高、乔木平均冠幅和相对物种系数、相对林高系数及乔木相对冠幅系数六项指标，我们发现，总体上非游览区各数值仍介于近景区和中景区之间，近景区数值最低，中景区数值则最高。实地调查中，我们也发现，近景区植被层次已不太分明，乔木非常稀少，林龄较小，灌木草本占绝对优势，大量的伴人植物出现，植被景观已无旅游美学价值；非游览区植被层次基本分明，乔木密度减小，灌木草本数量大增，其旅游价值部分已开始丧失；中景区则景观重要值最大，植被层次非常分明，种类丰富，形态构造富于变化，乔木层占绝对优势，林分成熟，旅游价值大。结果分析与实地情况基本相符，三个区域也充分显示了旅游对植被影响的三种态势。究其原因在于，当游览区植被受到旅游保护之后，即天龙山旅游开发之后，景区受到保护，当地社区人们的人为破坏活动开始转向非游览区。虽然近年来整个天龙山自然保护区的森林植被受到一定的保护，但自然保护和旅游开发与当地社区人们的生产、生活矛盾仍未得到有效的解决。

(2) 景区质量管理评价

由表 7-4 可知，旅游影响系数的排序为 $Q_1>Q_4>Q_2>Q_5>Q_3$，说明中景区管理水平好于近景区。Q_1 和 Q_4 的 TII 值之所以大，在于圣寿寺和漫山阁作为拳头景点，人为影响大，管理水平跟不上。Q_2 因其东北部天龙山庄的营业而致使其值较高。Q_3 值之所以最低，在于群落生境条件优越，抵抗力强，能迅速恢复稳定状态。同时，由 TII 值评价分级可知，Q_1 和 Q_4 为中下级，Q_2 为中级，Q_5 和 Q_3 良好，说明整个游览区管理水平呈中等水平，但某些地段已出现危机感。

表 7-4 旅游影响系数

样地	垃圾赋值 C_d	践踏赋值 C_t	折枝损坏赋值 C_s	植被现状赋值 C_v	旅游影响赋值 TII
Q_1	1.0	0.8	0.2	0.7	2.7
Q_2	0.6	0.6	0.4	0.50	2.1
Q_3	0.2	0.2	0.6	0.2	1.2
Q_4	0.8	0.4	0.8	0.5	2.5
Q_5	0.6	0.4	0.4	0.3	1.7

由表 7-2 可知，伴人植物比例大小为 $Q_1>Q_4>Q_2>Q_3>Q_5$。这表明伴人植物的多寡与旅游影响系数成正相关。

(3) 建议

鉴于天龙山植物群落现状，为使其发挥更大的旅游价值，必须进一步加强景区管理水平。① 合理规划景区商业网点和游径，加强旅游区商业管理，实施"谁污染，谁治理"的策略，使其废物自净。② 制定旅游区相应的法律体制，与游客、从商者经济利益直接挂钩，杜绝一切破坏活动的发生。③ 加强垃圾管理，实现垃圾资源化，树立环保标志物，提高游客自身素养。④ 保护古树名木，消除病虫等自然灾害的发生，维护植被景观的美学效益。⑤ 快速解决当地社区人们的生产、生活问题，使其深切体会到旅游业带给他们的好处，积极投入其中，成为建设和经营旅游区的主力军。

(二) 旅游与人文环境的案例分析

——芦芽山生态旅游开发与社区人们的行为特征研究

旅游社区人们是旅游地的主人，其生产、生活与旅游地的发展息息相关。社区人们能深刻直接地感悟旅游业造成的各种影响，而这些影响又会潜移默化地影响社区人们的行为举止。反过来，社区人们行为特征又会对旅游业的发展起着或正或负的效应。在旅游业的发展过程中，社区人们扮演着极为重要的中间媒介的角色。可以说，社区人们行为活动是旅游业可持续发展的重要内容。因此，探讨旅游社区人们的行为特征和旅游开发对旅游社区的各种影响同等重要。通过分析社区人们的行为特征，可以获知旅游业造成的各种影响，积极吸取社区意见，纠正以往发展的不足，为下一阶段发展旅游业做好前期的准备工作。

相对于传统旅游区而言，自然保护区的旅游业与社区人们的关系显得更为重要。自然保护区的旅游业属于纯粹的生态旅游业。自然保护区的主要任务是保护珍稀濒危的动植物等自然资源，在旅游业不断发展的情况下，自然保护区无疑又面临着自然资源保护和旅游开发的双重矛盾。保护区主要是针对当地社区人们加强自然资源保护，而社区人们行为特征又是旅游开发的重要内容。由此可见，社区人们在生态旅游业中具有举足轻重的地位，研究生态旅游社区人们的行为特征具有重大的现实意义和理论意义。在此以芦芽山自然保护区为例，结合前人的研究成果，分析生态旅游社区人们对旅游影响的态度，并进行一些有益的探讨。

1. 芦芽山自然地理及旅游概况

芦芽山自然保护区位于吕梁山北端，是管涔山的主峰，约北纬 38°36′~39°02′，东经 111°46′~ 112°54′，面积 21 453 hm^2，跨宁武、五寨等县的部分地区。该区属暖温带半湿润区，夏季凉爽多雨，冬季寒冷干燥。芦芽山具有丰富的生态旅游资源。地貌形态多样，生物资源异常丰富，气候、植被、土壤呈明显垂直变化。山势险峻，状如"芦芽"，云缠雾障，奇松怪石杂生其间，青苔绿衣附于其上，故有"芦芽滴翠"之美称。

森林浩瀚，古树参天，奇峰林立，险涧深幽，石奇状怪，绿水横溢，蕴藏了绝佳的险奇自然景观。迷人景点主要有：迎客松、天涧、束身峡、舍身崖、看花台、金龙池、南天门、将军石、石猴观海、金蟾吐珠、护林老翁、荷叶坪、九曲清涟河、芦芽日出等。它们与其古老的神话传说，给芦芽山增添了神奇的迷人色彩。芦芽山自然保护区集山、水、林、草、石、庙、花、鸟、虫等自然与人文景观于一体，是人们返朴归真、回归自然、旅游观光的理想去处，又是经济开发、资源考察、教学实习、科学研究、影视拍摄、猎奇探险的理想基地。自 20 世纪 90 年代以来，芦芽山旅游业悄然兴起。它以其特有的生态景观，吸引了大批游客实现回归大自然的需求。近年游客量突飞猛增，2000 年达 20 余万人。但具有明显的季节性，尤以 7 月、8 月、9 月为最。

2. 研究方法

1999 年采用问卷的方式对芦芽山自然保护区附近的村庄进行调查，主要有西马坊村、后吴家沟村、北沟滩村、李家沟村、圪洞村和在旅游商业区——冰口凹从事旅游业的当地社区人们。调查方式主要是通过村干部将调查表随机发放给各家庭，也有少部分问卷是通过亲自调查获得的。调查项目不仅包括社区人们的性别、年龄、职业、文化程度、年收入和与旅游业的关系等背景概况，而且包括社区人们对旅游地环境保护等 30 项态度调查，调查项目分四个等级，让社区人们以满意度的形式回答。

3. 结果分析

(1) 社区人们的基本情况

表 7-5　被调查社区人们的基本情况

项目		比例	项目		比例
性别	男	69.5	职业	学生	11.0
	女	30.5		教师	3.4
年龄	15~20	15.3		从事旅游业的国家职员	2.5
	21~30	29.7		从事旅游业的个体农民	24.6
	31~40	28.0		从事农业的普通农民	53.4
	41~50	13.6		其他	5.1
	51~60	10.2	年收入	<1000	16.1
	>60	3.4		1000~2000	23.7
文化程度	文盲	11.0		2000~3000	18.6
	小学	16.1		3000~4000	14.4
	初中	50.8		4000~5000	9.3
	高中(中专)	18.6		5000~6000	4.2
	大专及以上	3.4		6000~7000	4.2
有无从事旅游业者	有	37.3		7000~8000	3.4
	无	62.7		>8000	5.9

由表 7-5 可知，男性占 69.5%，女性占 30.5%，男性多于女性。年龄段主要集中于 21~40 岁之间，占 57.7%，其他不同层次的年龄段各有一定的比例，分布比较合理。社区人们文化程度以初中水平为主，占 50.8%，高中(中专)及以上的占 22.0%，小学及以

下的占 27.1%。被调查社区人们的职业分布中，从事农业的普通农民最多，占 53.4%，其次是从事旅游商业、服务业的个体农民，占 24.6%，初高中生也占一定的比例，达 11.0%，从事非农业、非旅游业的其他个体经营农民和企事业单位职工、教师及从事旅游业的国家职员也各占有少量的比例。在调查样本中，家庭中无从事旅游业者占 62.7%，有从事旅游业者占 37.3%。社区人们的年收入分布中，年收入<1000 元者占 16.1%，1000~3000 元者占 42.3%，3000~4000 元者占 14.4%，年收入>4000 元以上的分布段则逐渐减少。从以上分析可知，本次调查的样本分布范围较为理想，结合社区各项指标的实际情况，包括了不同年龄、不同文化程度、不同职业、不同收入和与旅游业不同关系的社区人们，说明被调查的社区人们的行为特征能够充分反映旅游开发的影响程度，但同时也有一定的局限性，男性比例较大。

(2) 社区人们对自然保护区保护的态度

调查表明，在社区人们中知道该区是自然保护区者占 86.4%，不知道者则占 13.6%。说明大多数社区人们具有保护意识。但从表 7-6 可知，近年来肯定态度者仍有许多非法活动发生。其中采蘑菇和挖药材的频率最高，分别达到 52.9%和 38.2%，其次是放牧活动，达 18.6%，拣薪材的频率也较高，伐木和狩猎活动很少发生，这是因为该区主要保护褐马鸡和森林植被。相对而言，否定态度者的挖药材、采蘑菇和放牧活动最为频繁，其次为伐木活动和拣薪材，狩猎行为很少发生。

表 7-6 社区人们的非法活动

非法活动	肯定态度者的比例 /%	否定态度者的比例 /%
挖药材	38.2	68.8
采蘑菇	52.9	68.8
拣薪材	10.8	6.3
伐木	1.0	12.5
狩猎	0	0
放牧	18.6	56.3

尽管芦芽山自然保护区的保护事业已众所周知，但近年来社区人们在自然保护区的非法活动仍时有发生。其中挖药材、采蘑菇和放牧活动最为频繁，其次为拣薪材，狩猎行为已经杜绝，偷伐行为仍不容忽视。说明社区人们在未能很好地解决其生活、生产的需要之时，其矛头便不可避免地要指向自然保护区。狩猎行为之所以近于杜绝，是因为该区对褐马鸡的保护措施比较强硬。同时也说明自然保护区在对社区人们加强资源保护的同时，未能周全地考虑社区人们的客观需要，未能正确地帮助社区人们解决怎样致富和加强资源保护的双重矛盾。

表 7-7 社区人们对保护区保护的态度

调查项目	反对 /%	一般 /%	同意 /%	非常同意 /%
建立保护区很重要	11.9	11.0	38.1	39.0
保护区有利于你的家庭	20.3	19.5	39.8	20.3
保护区对整个村庄有利	16.1	18.6	44.9	20.3
有权使用保护区内的资源	57.6	11.0	21.2	10.2

由表 7-7 可知，77.1%社区人们认为建立保护区重要和很重要，但仍有 11.9%的人反对建立保护区，11.0%的人持无所谓的态度。60.1%的社区人们认为保护区的成立有利于和非常有利于他的家庭，20.3%的人认为不利于他的家庭，19.5%的人认为保护区的成立与家庭无密切关系。65.2%的社区人们认为保护区对整个村庄有利和非常有利，但仍分别有 16.1%和 18.6%的人持反对和无所谓的态度。正是由于以上的各种观点，所以57.6%的社区人们认为他们无权使用保护区内的资源，11.0%的居民认为使用与否都无所谓，21.2%的居民认为可以使用，10.2%的人认为完全有权使用保护区内的资源。以上说明，自然保护区的保护事业已经得到大多数社区人们的支持，但仍有少数居民持反对和无所谓的态度。

(3) 社区人们对旅游影响的态度

旅游业具有较强的关联能动性，吸收大量闲散的劳动力，促进旅游目的地的经济结构发生改变，给社区人们带来客观的经济利益。由表 7-8 可知，只有 19.5%的人认为旅游业不会成为当地主要的经济支柱，但 65.2%的人都认为旅游业可能和很可能成为主要的经济支柱，甚至 15.3%的人认为它一定能成为经济支柱。54.2%的人认为旅游业有点改变了他的经济观念，持大大改变者占 15.3%，但仍分别有 13.6%和 16.9%的居民感觉一般和没有改变。57.6%的人认为旅游对物价上涨有所影响，25.4%的居民认为二者毫无关系， 10.2%的居民则认为二者关系一般。至于旅游是否增加了社区人们的工作机会，44.1%的人认为有所增加，21.2%的人认为大大增加，但仍有 18.6%的人持否定态度，16.1%的群众认为关系不大。大多数人(占 53.4%)认为旅游业只对少数居民有利或无利，但同时 46.6%的人认为对多数人有利。62.8%的人认为生活水平提高与旅游业密切相关，同时 16.1%和 21.2%的居民认为关系不大和毫无关系。调查中，55.1%的群众愿意参与旅游业经营，22.0%的居民已经参与，22.9%的群众对旅游业反应冷淡。以上这些数字说明旅游业对社区具有一定的经济影响，使部分人们的经济状况得到改观，一定程度上也强化了一定数量的社区人们的经济意识，但仍有相当多的群众对此反应迟钝和冷漠。

表 7-8 社区人们对旅游经济影响的态度

调查项目	反对 /%	一般 /%	同意 /%	非常同意 /%
旅游业将成为主要的经济支柱	19.5	39.8	25.4	15.3
旅游业改变了你的经济观念	16.9	13.6	54.2	15.3
旅游引起物价上涨	25.4	10.2	57.6	6.8
旅游增加了工作机会	18.6	16.1	44.1	21.2
旅游业对多数人有利	4.2	49.2	26.3	20.3
生活水平提高与旅游业有关	21.2	16.1	47.5	15.3
你愿意参与旅游业经营	7.6	15.3	55.1	22.0

由表 7-9 可知，有 39.8%的社区群众认为交通状况有点改善，16.9%的群众认为大大改善，但仍有 24.6%和 18.6%的居民认为交通没有得到改善和改善一般。49.2%的社区人们认为通讯信息仍不方便，16.9%的人也认为一般，仅有 33.9%的人认为通讯信息

较为方便。购物机会很难衡量是否增多，因为持增多态度者占 50.9%，持否定和一般态度者占 49.2%。对于娱乐机会，66.9%的人认为没有增多或很一般，持增多态度者仅占 33.0%。至于公共设施，48.3%的人认为它得到一定程度的改善，但仍有 51.7%的居民认为没有改善和改善一般。对于旅游垃圾和旅游噪音，绝大多数人(各为 85.6%和 86.4%)都认为明显增加。旅游业的发展无疑给自然环境造成一定的负面影响，持肯定态度者占 61.1%，持否定态度者占 38.9%。这些调查数字充分说明，旅游业的强大关联效应在本区并没有很好地体现出来。发展旅游业所需要的基础设施，除交通状况有所改善外，其余通讯设施、购物、娱乐和公共设施等改善一般，甚者维持原状。相反，旅游垃圾和噪音都明显增多，自然环境也有一定程度的破坏。这说明近年来芦芽山旅游区已经吸引了相当多的游客青睐，旅游基础设施并不能与旅游状况相配套，需要亟待改善。

表 7-9 社区人们对旅游环境影响的态度

调查项目	反对 /%	一般 /%	同意 /%	非常同意 /%
改善了交通状况	24.6	18.6	39.8	16.9
通讯信息很方便	49.2	16.9	25.4	8.5
购物机会增多	28.0	21.2	35.6	15.3
娱乐机会增多	36.4	30.5	28.8	4.2
改善了公共设施	33.9	17.8	42.4	5.9
旅游垃圾增多	6.8	7.6	38.1	47.5
旅游噪音增多	5.9	7.6	48.3	38.1
旅游引起环境破坏	22.0	16.9	49.2	11.9

由表 7-10 可知，54.2%的社区人们认为旅游业的发展使传统文化有所改变，10.2%的人认为它大大改变，16.1%的居民则认为二者关系一般，甚至 19.5%的居民持否定态度。至于公众文明程度，分别有 50.0%和 18.6%的居民认为它有所提高和大大提高，但仍有 17.8%的居民认为文明程度一般，13.6%的居民认为它没有得到提高。游客高消费对社区人们生活方式的影响正处于一种潜移默化的过程之中，因为 49.2%的群众持肯定态度，50.9%的群众持否定态度或二者相关很差。对于违法犯罪现象，65.3%的社区人们认为没有明显增加，而 34.7%的人认为有所增加。同时，49.2%的居民感受不到旅游所带来的痛苦，25.4%的居民感受一般，仅有 22.9%的居民有所体会，2.5%的人体会深刻。

表 7-10 社区人们对旅游社会影响的态度

调查项目	反对 /%	一般 /%	同意 /%	非常同意 /%
旅游改变了传统文化	19.5	16.1	54.2	10.2
公众文明程度得到提高	13.6	17.8	50.0	18.6
游客高消费改变了生活方式	31.4	19.5	44.1	5.1
违法犯罪现象增多	33.9	31.4	30.5	4.2
感受到将承受旅游所带来的痛苦	49.2	25.4	22.9	2.5
愿意与游客接触	5.1	14.4	61.0	19.5
应该发展旅游业	4.2	11.0	31.4	53.4
政府应当支持发展旅游业	4.2	5.1	39.0	51.7
本村应该成为旅游服务点	6.8	13.6	44.1	35.6

谈到社区人们是否愿意与游客接触这一点，80.5%的人持肯定态度，14.4%的人持无所谓的态度，但仍有 5.1%的人持反对态度。对于今后发展旅游业这一问题，绝大多数人都认为应该发展旅游业(比例为 84.8%)，政府应当支持发展旅游业(比例为 90.7%)，本村也应该成为旅游服务点(比例 79.7%)，仅有少数人持无所谓和否定的态度。

这些调查数字说明，芦芽山生态旅游业的正面效应大于负面效应，其社会影响良好。在旅游业现代文化气息的浪潮下，传统文化有所改观，公众文明程度有所提高，其生活方式也正在发生着潜移默化的变化。同时，违法犯罪现象并没有增多，旅游业也没有使社区人们感受到苦恼与不便。相反，社区人们对旅游业仍充满信心，对兴办旅游业，表现出强大的劲头。

4. 讨论

Hasan 认为旅游地居民对待旅游活动影响的态度可能包括反抗、退却、有条件支持、主动支持、同化，其中主动支持可以分属于有条件支持和同化两个范畴。陆林根据此观点，认为对于假定的理想均质社区居民对旅游的态度可能是以下四种情况之一：反抗、 退却、支持和同化。保继刚等则认为旅游地居民态度是一个从欢迎到憎畏的过程。在此基础上，我们认为旅游社区人们的行为态度则是一个冷漠或欢迎、退却、憎畏、支持和同化的逐步发展的过程，经济利益是其演替的根本动力。正如人类社会的进化一般，不同层次背景的社区人们的态度可以跨越其中的一个或两个阶段，而且其态度的顺次演替有着不同的时间长短差异。开明的社区人们可以从一开始的欢迎飞速跨越到对旅游业的支持，甚至同化的层次，态度转变得快；而思维闭塞、文化程度低、贫穷落后、传统式的社区人们一开始便对旅游业抱着一种冷漠、怀疑，继而是退却的态度，当其切身利益受到损害时，即刻表现出憎畏感，甚至采取种种手段，与游客为敌，阻拦旅游业的顺利发展，只有在某一时刻，突然感悟到旅游业的经济利益的存在，其态度才有所好转，在经济利益的乘数效应下，逐步向支持、同化阶段过渡，这一类型演替时间较长。

从以上结果看，大多数社区人们对旅游的三种影响反应良好。芦芽山生态旅游业正处于初期阶段，社区人们的行为特征也正处于第一阶段，即欢迎或冷漠。生态旅游业的开展，不仅使多数人们从经济上得到一定的实惠，而且从生活、生产的某些基本环境上得到一定的便利。近年来，尽管旅游污染使社区人们的生活环境和自然环境受到一定的影响，但仍然能被人们的心理容量和旅游环境容量所接受。同时，在示范效应的强烈感染下，社区的传统文化、文明程度和生活方式都有不同程度的改进。我们深知，旅游业的兴起依靠的是生态旅游资源，而生态旅游资源的保护未免或多或少地限制了少数社区人们的切身利益，从而使他们产生厌恶感，采取与之对立的态度。当然，少数思想保守、信息闭塞的普通农民由于不能深悟旅游业的经济特性，而对此采取了冷漠或无所谓的态度。

通过分析，我们还发现旅游业的发展并没有考虑社区人们的客观需要，而是一味地满足游客的要求，以牺牲社区人们的利益来换取游客数量的增加和旅游体验的满足，从而致使社区人们反应迟钝或与之对抗。生态旅游业的开展应当把社区人们作为一种有益的组合元素，让他们参与进来，因为社区人们是旅游地的主人，旅游地的发展就是他们

自身的发展，他们有权参与旅游方针政策和计划的制定、实施、监督和评估工作。只有同社区人们联起手来，充分保障他们行使当家作主的权利，生态旅游业的发展才有坚强的后盾力量。另一方面，也应该对游客加强自身道德教育，避免他们把其不良行为带入社区，以保证社区传统文化、生活方式和社会公德的健康发展。同时在自然保护区则应加强生态意识教育，珍爱大自然，把对自然环境的破坏减小到最低程度。

第四节　旅游环境承载力

迄今为止，旅游环境承载力是旅游学界的一个争论最多的热点领域，同时它也是旅游生态学研究中的最重要的内容。正确地认识和把握旅游环境承载力的内涵和应用，对于旅游生态学学科的发展有着重要的指导意义。但对于旅游环境承载力研究和应用上的难点，关键在于如何在理论上阐释旅游环境承载力的一系列问题，更在于在实践中建立一套评价指标及其中的经验值，最终用来指导旅游规划和管理，保障旅游业的持续发展。旅游环境承载力的实用价值集中体现在两个方面：一方面，在旅游地的规划和管理中作为一种强有力的工具，以保护旅游地的环境免遭退化或破坏；另一方面，旅游环境承载力作为一种管理工具而使用，在客观上也保证了旅游者在旅游地的体验质量。

一、旅游环境承载力的科学表述

“环境承载力”是指在某一时期、某种状态或条件下，某地区的环境所能承受的人类活动作用的阈值。这里“某种状态或条件”是指现实的或拟定的环境结构不发生改变的前提条件；所谓“能承受”是指不影响环境系统发挥其正常功能的条件。因此，环境承载力的环境本身具有的自我调节功能的量度、大小可以用人类活动方向、强度和规模来反映。

旅游环境承载力是由上述概念派生出的一个具体概念，其定义表述为：在某一旅游地环境(指旅游环境系统)的现存状态和结构组合不发生对当代人(包括旅游者和当地居民)及未来人有害变化(如环境美学价值的损减、生态系统的破坏、环境污染、舒适度减弱等过程)的前提下，在一定时期内旅游地(或景点、景区)所能承受的旅游者人数。

旅游环境系统是一个由物质、能量和信息的内部流动与输入输出而形成的开放系统，其结构、组成既有相对的稳定性，又有绝对的变动性。因此，它对于旅游经济的支持能力也具有双重性，即相对稳定性——在一定时期内旅游环境系统对旅游经济活动的支持能力的阈值稳定在某一数值附近；绝对的变动性——短期的波动和长期的突变。建立在这种特征环境系统之上的旅游环境承载力具有以下特点：

1）客观性与可度量性。在一定时期内的旅游环境系统在结构、功能、信息诸方面具有相对的稳定性，即不发生质的变化，因此反映旅游系统结构组成特征的旅游环境承载力具有在量和质两种规定性方面的客观性，并可以通过一定的手段来把握和计算。例如某一独立景点在一定时段内(指没有经过大规模改造的时段)所能承载的旅游者数量的阈值保持相对稳定，且这一阈值具有可度量性。

2）变易性。由于人类对旅游环境系统施加作用，如增设新的旅游景点，或由于系

统本身的运动变化；因降水增加而引起的湖泊水面旅游面积扩大，均会引起旅游环境承载力的变化(上述两例均为承载力的增加)。因此，旅游环境系统在结构组成上的变化，反映在承载力上，就是在量和质两种规定性的变动；质的规定性上的变动表现为旅游环境承载力指标体系的改变，在量的规定性上的变动表现为指标值大小的改变。

3) 可控性。人类对旅游环境系统实施改造必须在充分掌握其运动规律和系统特征的基础上完成，因此根据一定的需求和目标，人类可以对环境进行适度改造，例如改变旅游资源品类和数量，从而使旅游环境承载力在量和质两方面朝人类预定的目标变化，我们把它的这种特性称为可控性，但这种可控性是有限度的。显然，改变旅游地的性质即它所承受的旅游活动类型变化所造成的旅游承载力值的变动最为显著。

4) 存在最适值和最大值。最大值或称饱和承载力，是旅游承载的极限，超出此极限值则视为超载。长此以往，旅游环境系统会遭到质的破坏。最适值或称最佳承载力既能保证旅游环境系统的功能发挥最适，又不会导致“疲劳”态，经济收益也比较理想，因此旅游规划人员对它最感兴趣。

二、旅游环境承载力的组成体系及其实现

旅游环境承载力是一个综合概念，它取决于根据不同的旅游环境要素内容划分的各承载分量值的大小，其组成体系的划分见图 7-2。各承载分量的含义及其技术实现如下。

1. 环境生态承纳量(EEBC)

组成旅游环境系统的自然环境本身具有一定纳污能力，如大气、土壤、水都产生自净作用，即自维持功能，这种自净强度决定其承纳污染的能力，自然环境所承纳的旅游活动带来两个方面的消极影响：一个是环境的污染，如旅游者直接产生的固体废弃物，宾馆饭店等服务系统产生的污水、废气，旅游娱乐设施的运行产生的噪声等；另一个是生态的破坏，如游人对草地等植物的直接践踏，对野生动物生存环境妨碍而导致的种群迁移，游客对珍稀植物的采集而造成的品质退化或灭绝等。因此环境生态承纳量是指生态环境自恢复能力所允许的游客数量。其函数式为

$$EEBC = MIN(WEC，AEC，SEC，EEC)$$

式中：EEBC 为环境生态承纳量，取决于 4 个分量值：WEC 为水环境承载量(以水面为主要旅游资源，取 WEC=水环境容量/人均废水产生量；不以水面为旅游景点或不构成主要环境要素，则取无穷大)；AEC—大气环境承载量(对于不产生大气环境污染的旅游活动类型，可取无穷大；产生大气污染时，AEC=区域大气环境容量/人均废气产生量)；SEC 为 固体废弃物作用产生的容纳量，其公式为

$$SEC =(\sum S_iT_i+\sum Q_i)/\sum P_i$$

式中，S_i为第 i 种污染物自然环境净化量(量/日)；T_i为第 i 种污染物的净化时间(日)；Q_i为每日由人工处理掉的第 i 种污染物量；P_i 为每位旅游者一天内产生的第 i 种污染物量； EEC 为自然植被(土壤)承纳量，取决于自身接受践踏并恢复的能力，须通过现场监测获得数据。

2. 资源空间承载量(REBC)

由于旅游者对风景(旅游资源)的欣赏具有时间、空间占有的要求而形成的某一时段内(如一天)的游客承载数量，称为资源空间承载量。其计算公式为

$$\text{REBC} = \text{资源空间总面积}/\text{人均基本空间标准}$$

其中基本空间标准因地而异，不同民情、不同游览项目的值不同，它的求得是比较和社会调查的结果。

3. 心理承载量(PEBC)

包括旅游目的地居民的心理承载量，即他们从心理感知上所能接收的旅游者数量(人/天)和旅游者心理承载量——游客所能忍受的拥挤程度，实际上，后者与 REBC 具有量上的一致性，因为空间标准的制定主要依据是游客对于密度的承受标准，因此这里讨论的心理承载量主要针对当地居民而言。

游客的过度密集导致的当地居民的排斥心理，主要来源于由此引起的交通拥挤、物价指数上涨过快、商品供给不足、社会治安不稳定、环境污染(主要是噪声、固体废弃物污染)、对城市基础设施的冲击过强、占用过多(如水资源、电力资源、生存空间等)。对于远离居民点的旅游地可以视为无穷大，但一般的景点旅游或多或少地与当地居民点联系，因此调查确认当地居民的心理承载量不容忽视。

4. 经济承载量(DEBC)

某一旅游地综合承载能力大小还取决于旅游经济条件，即满足游客的衣食住行等基本生活条件。图 7-2 所列的五大要素中，主导因素(基础因子)是投资的强度和规模。

经济承载量主要包括主副食供应、旅馆床位、水、电、煤气、热力、电话、交通车辆、停车场等诸方面的供给水平所能承载的旅游者人数，其计算公式为

$$\text{DEBC} = \text{MIN}(\text{DEBC}_1，\text{DEBC}_2，\cdots，\text{DEBC}_i)$$

式中：DEBC 为经济承载量(人/天)；DEBC_i 为第 i 种基本要素供给量形成的经济承载分量，$\text{DEBC}_i = S_i / D_i$，$S_i$为第 i 种要素的日供给量(量/天)，D_i为第 i 种要素的人均日需求量[量/(人・天)]。

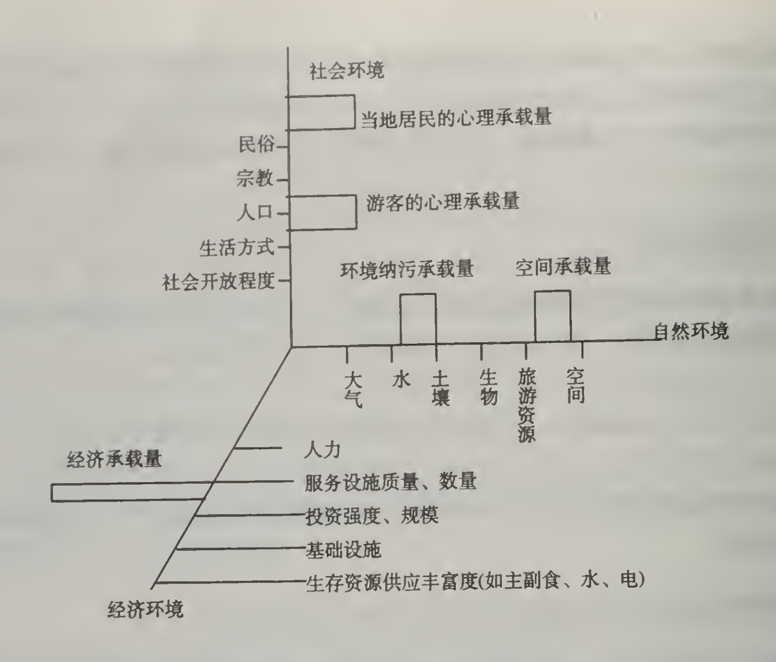


图 7-2　旅游环境承载力组成体系与相关指数(崔凤军　1995)

5. 旅游环境承载力(Tebc)的综合实现

从理论上讲，Tebc 等于上述四个分项的最小值，但由于各分项对它的贡献程度不同，即每超出各承载量值一个单位所引起的消极后果不同，各承载量最适人数与极限人数之差相去甚远。因此，对于重要性程度(即限制性强度)较低的承载量值应乘以一个大于 1 的系数，此系数应根据 AHP 专家调查或社会取证等方法，针对各分量指数的具体内容来确定。即

$$\mathrm{Tebc} = \min(X_1 \cdot \mathrm{EEBC}，X_2 \cdot \mathrm{REBC}，X_3 \cdot \mathrm{PEBC}，X_4 \cdot \mathrm{DEBC})$$

式中：X_1，…，即是作用系数。

三、旅游环境承载力——可持续发展的旅游判据之一

综上所述，旅游环境承载力本质上是旅游环境系统组成与结构特征的综合反映，而持续发展旅游的首要标志是旅游经济与环境的协调，作为旅游环境系统与旅游经济联系的中间环节的旅游环境承载力，历史地成为判断旅游是否是持续发展的一个重要指标，当旅游环境承载量/旅游环境承载力(极限值)<1 时，说明尚未超载，还具有发展潜力。

当然，是否是持续发展的旅游还取决于：① 经历了旅游活动的旅游者是否得到高品位的精神享受(指大多数游客的感受)；② 是否促使当地经济发展和人民生活水平的提高；③ 是否促使当地社会、精神文明的加强；④ 资源环境的贡献与消耗之比，即指数

K=旅游收入/旅游环境损耗是否最优。但从更深层次上讲，这四个指标均为旅游环境承载力的函数。

旅游环境承载力还具有以下作用(功能)：① 旅游承载力，特别是最佳承载力，是进行旅游规划的基础性材料，借以保证旅游者数量严格控制在极限承载量之下。② 根据旅游承载力的分量值，寻求影响总体承载力发挥的限制性因子，为拓展旅游承载力提供突破点。③ 根据旅游承载力的时空差异，寻求解决季节性分配不均、景点冷热程度不一的途径，为制定空间分流和季节调配方案提供依据。④ 旅游景点的超载会导致短期经济收益的增加和旅游环境系统的破坏，而景点游客的过度稀疏(远离承载力饱和点)会导致旅游资源的闲置、浪费和经济收益的低下。

因此，可根据各旅游景点的承载力利用程度，对远离饱和点的旅游地实施“引凤”工程，或改变旅游活动类型，或改变资源组成、结构，或着力加强交通可及性，加大广告宣传力度以充分利用旅游承载力资源。

旅游环境承载力的提法目前在国内尚不多见，但对于旅游环境容量的研究已有较大的进展，我们所提及的承载力理论与旅游容量在概念、技术实现诸方面有一定的共性，然而后者使用中存在一些缺陷，如“客观量”无法突出旅游环境系统的主动性(人具有能动性，心理承载量的提法优于心理容量)，不具备旅游承载力的可控性等特征。因此，完善旅游环境承载力理论，为旅游经济与环境提供了协调判据，是旅游科学研究的一项重要任务。

第五节　旅游地的规划设计

旅游规划是旅游业规划与旅游地(区)规划的合称。旅游业规划属于行业发展规划。旅游地规划是工程建设规划，以土地利用规划为基点，包括旅游景观的设计、游径的设计、景区结构与功能的设计等诸方面内容。旅游地规划需要旅游行业发展规划的指导。旅游生态学主要侧重研究旅游地的规划。

旅游地是指一定地理空间上的旅游资源同旅游设施及相关的其他条件有机结合在一起作为旅游者停留和活动的目的地。旅游地要取得旅游业成功，首先必须拥有一个正确可行的旅游规划。旅游规划是落实旅游管理目标、协调旅游与环境之间的矛盾的一项有力措施，是指导旅游地系统协调运转的理论指针。

一、旅游地的规划技术路线

我国20世纪80年代的旅游规划工作基本沿着资源导向的思路，以资源性质决定旅游活动类型，然后进行规划，这是卖方市场条件下旅游规划的基本特征。这方面的实例研究很多。这种规划具有很大的主观性。90年代以来旅游市场需求发生变化，由卖方市场转向买方市场，随之市场导向的旅游规划日益受到重视，这突出表现在旅游地和一些具有良好客源市场的大城市人为创造旅游资源上，有些取得良好的经济效益，如深圳的锦绣中华园，但是纯市场导向的旅游规划在一些地区容易导致成脱离实际条件的旅游项目建设。

资源导向的规划思路强调了资源的一面，市场导向的规划思路则强调了市场的一面。显然，这两种导向都不利于制定正确的旅游规划。我们认为，即使同时兼顾资源导向和市场导向的旅游地规划，也是不足取的。这是因为任何一个旅游地都有一个环境承载的范围，包括自然生态环境、社会心理容量、旅游氛围等等的承载力。此外，旅游市场研究中还考虑到旅游者在旅游地的行为规律。

旅游地的规划确实是一个复杂的问题，但还是有一定的技术路线可供遵循。在规划过程中，要尽量避免对资源、市场、环境承载力等的主观评价，迫切需要建立一套科学的评价方法与技术。

1. 旅游资源调查与评价技术

旅游资源是发展旅游业的物质基础，有自然的、历史的、人为创造的，有有形的和无形的。由于旅游资源的广泛性、动态性，长期以来各方面对旅游资源的认识和评价一直难以达成共识。结合我国旅游开发的实践，近期郭来喜、吴必虎等学者已经建立了一套中国旅游资源普查规范的体系。这为我们调查和评价旅游资源提供了一个统一的标准，有利于旅游资源调查和评价的规范化。在从旅游开发价值的角度评价旅游资源上，我们应树立三个原则：① 资源的旅游开发价值取决于区域旅游市场的发育程度；② 在不同层面评价开发价值是不同的，从全国、区域、省市、地方等不同层面来评价，结论显然不同；③ 要从价值与开发条件两个方面进行评价，价值说明旅游发展潜力，开发条件说明旅游发展的制约因素和有利因素。

对旅游资源调查要根据规划区的大小来定，一般从自然景观、历史景观、社会文化景观、经济景观四个方面进行全面调查。要把文字资料与实地调查相结合，把照片、录像、记录相结合。旅游资源评价有定性和定量两类。定性评价具有主观性，受个人的经历、偏好和文化水平影响很大，是一种经验评价。定量评价比单纯的定性评价前进了一步，但仍然存在主观打分定级问题。如层次分析法、模糊数学法等，表面客观，实质有主观性，科学的评价方法还有待于进一步完善。

2. 旅游市场和旅游者行为调查与分析技术

旅游市场和旅游者的行为规律的调查是搞好旅游地规划的又一基本环节。人本主义是旅游开发的最基本原则，旅游地的一切服务都是面向游客的。倘若旅游地的旅游资源和服务设施不为游客服务，其实也就根本没有旅游业的存在。有了旅游市场，不按旅游者的意愿来加以规划，旅游业也不会取得好的效果。因此，旅游地的发展规划，不仅需要搞清旅游市场，而且还要摸清旅游者的行为规律。

旅游市场资料的获取有两种途径：一是旅游管理部门、接待系统及相关部门的统计资料，通过对这些资料的分析可以了解市场背景和总体现状。二是市场调查。问卷抽样调查是旅游市场调查最常用的方法。调查内容根据具体要求具体设计，一般包括：① 需求调查；② 客源结构调查；③ 行为调查；④ 跟踪调查。调查结果的可靠性主要取决于问卷设计的科学性、样本选取的代表性。对市场的正确把握不是一次调查就能确定的，需要通过长期的市场调查资料的积累来分析市场特征，所以有必要建立旅游市场数据库。

旅游空间行为是人们在地域上进行旅游和游玩的过程。旅游空间行为有大、中、小三个尺度，旅游地规划中主要研究小尺度的旅游空间行为。旅游空间行为以决策行为为基础，空间行为中的许多特征是由决策行为的原则所决定的。而旅游决策行为主要受感知环境、最大效益原则和旅游偏好等因素所影响。通过问卷调查中的游客行为调查项目，可以推知旅游者的决策行为，从而预测其行为规律；同时结合实地观察，就可以获知旅游者在旅游地的行为。研究旅游者的行为，其意义不仅在于揭示旅游者的行为规律，而且以此来考虑资源评价和开发、接待设施的选址，可以得到许多仅从资源条件和市场条件出发进行研究所不能得到的结论。结合旅游者的行为规律，我们可以更准确地规划景区的结构，从而达到既满足游客的旅游体验，又保护旅游景观的目的。

3. 经济社会环境影响评价技术

旅游开发项目都需要进行技术经济论证，包括项目财务评价和经济影响评价、风险和不确定性分析、方案比较与选择。国家对工业建设项目的经济评价制定了相应的参数和规范，而对于旅游项目经济评价的参数还没有制定，需要在实践中探讨总结。一些大型项目或特殊旅游项目必须进行社会评价，分析项目开发对地方各项社会发展目标所做的贡献与影响，主要指标有就业人数、移民、生活方式、风俗习惯、医疗设施、生活质量、环境质量等。

环境影响评价是旅游地规划的重要内容，其中承载能力是最基本的问题。随着旅游业的发展，游客的增加，旅游地是否具有充足的经济条件来满足所有游客的衣、食、住、行、娱、购活动，旅游社区居民的心理承载能力如何，旅游者对旅游氛围的感知程度如何，自然生态环境是否能够维持自净功能。这些问题都是旅游地规划时应该考虑到的。此外，不同类型的旅游目的地，甚至同一旅游地的不同地段，环境敏感性不同，因而也便具有不同的承载能力。

旅游对环境的影响可分为积极的和消极的两个方面，前者表现为旅游发展促进了对环境的保护，后者表现为对环境的污染甚至转变为灾害。目前风景区存在的污染主要有大气污染、垃圾污染、水体污染、噪声污染和视觉污染。污染可以治理，采用先进的科学技术，实行科学的管理，可以防治污染。反之，持续污染，不予治理，就会改变景区生态环境的结构，使环境质量发生质变，导致风景灾害的发生，资源退化，旅游业衰退。根据旅游地生命周期规律，旅游地在不同的发展阶段，旅游行为与环境相互作用的特征不同，环境风险随着旅游人数的增多而增大，在不同阶段要有不同的措施来调控旅游的负面影响。

4. 制图技术

旅游规划与设计离不开图纸，不同层次的旅游规划应有一套相应的图纸，把规划内容尽可能落实到图纸上。

(1) 旅游发展规划的文件和主要图纸

① 规划文件包括规划文本和附件、规划说明及基础资料收入附件。

② 图纸包括区位分析图、旅游资源评价图、旅游功能分区与项目布局图、旅游交

通图、分期建设图。区位分析图不仅仅是位置的标识，而且是对规划区与区域旅游资源关系、市场关系、交通关系的分析，全面表现规划区的背景、优势与劣势。资源评价图一般要通过不同符号与颜色来表现资源的等级与分布。功能分区与项目布局图是对旅游用地、资源特色、道路交通等方面的综合的结构分区，体现旅游发展格局，在每一个区中表示主要旅游项目的位置与分布。旅游交通图要表现规划区内主要旅游景点之间的交通关系以及与主要接待中心之间的交通关系和规划道路及其等级。分期建设图主要表现近、中、远期规划区开发建设格局。

旅游发展规划从工程建设角度来看具有规划纲要的性质，图纸比例可以根据规划区大小来定，如 1∶100 000、1∶50 000 等。

(2) *旅游地总体规划*

① 规划文件包括主要旅游项目策划与可行性研究、规划文件和附件、规划说明及基础资料收入附件。

② 图纸包括现状图、区位图、土地利用总体规划图、道路交通图、各项专业规划图及近期建设规划图。图纸比例一般为：1∶5000。

(3) *旅游地详细规划*

以总体规划为依据，详细规定建设用地的各项控制指标和规划管理、旅游行为要求。一般分控制性详细规划和修建性详细规划。

二、旅游地规划设计的原则

传统的旅游开发往往忽视了对旅游资源和环境的保护，结果造成一系列的生态学问题。在旅游生态学中，旅游开发首先强调的是对旅游资源和环境的保护，保护是开发的前提，保护和开发是不相分离的，是融为一体的。因而旅游地的规划设计必须坚持这一思路。

1. 原汁原味原则

在旅游开发时要尽量保持旅游资源的原始性和真实性。具体表现在不仅保护大自然原始韵味，而且保护当地特有的传统文化，避免因开发造成文化污染，避免把城市现代化建筑移置到旅游景区。旅游接待设施应与当地自然及文化协调，保证当地自然与人的和谐的意境不受损害，提供原汁原味的“真品”和“精品”给游客。也只有坚持原汁原味的原则，才能真实地反映旅游地人与自然协调共生的生态美。

2. 生态学原则

旅游生态学是应用生态学的一个分支学科，旅游地的规划设计应当贯串生态学的理论指导。任何一个旅游地都是具有特定结构和功能的生态系统，是一个由多个斑块、廊道所组成的整体的旅游景观。旅游地景观的格局及其生态过程有其自身的规律性，我们应据此来设计景观的结构，以遵循其生态过程的连续性，改善其功能。

3. 承载力控制原则

旅游地是一个特定空间的地理区域，社区的经济发展程度、社区人们对旅游业的支持和认可都有一定的限度。在旅游开发和利用过程中，应遵循旅游环境承载力的基本理论，及时协调旅游与环境的相互关系，以免旅游资源及环境受到破坏。因此我们应该把旅游活动强度和游客进入数量控制在资源及环境的“承载力”范围之内。

4. 环境教育原则

旅游解说系统是旅游地向游客宣传和介绍自己的一种媒介。传统的旅游开发只注重宣传其旅游资源、旅游交通及景区的其他状况，而忽略了对游客的环境教育，认识不到环境教育对旅游区的作用。欲使游客在愉悦中提高环保意识，减少旅游地的环保负担， 旅游开发时，必须认真考虑在旅游区中设计一些能启迪游客生态环境意识的设施和旅游项目。

5. 依法开发的原则

旅游开发必须遵循相应的保护法规，如自然保护区的开发必须遵循《野生动物保护法》、《森林法》和《自然保护区管理条例》。当然，旅游开发方面的法制不够健全，这方面的工作以后会不断充实。

三、旅游地的规划设计

1. 旅游地的文脉分析

文脉分析就是地方性研究。地方性研究是区域旅游规划设计的基础工作。其主要任务就是通过对规划区域的地方特征的把握，对地方历史文化的“阅读”和提炼，精确地总结该地的基本风格，我们称其为“地格”的确定。确立地方风格是制定旅游开发方案的第一步，目的在于为整个地区的旅游开发定一个基调，或叫中心形象。旅游规划应以文脉特征为基础，“分地段”开发旅游产品，形成不同的旅游情调，并针对具体的旅游区的性质和景观特征，探讨旅游产品的形象策划。特别注重因文脉的差别来区分各不相同的功能分区和地段划分，然后就其综合特点规划设计并开发相应的旅游产品。如我们在对芦芽山旅游区规划时，根据该旅游区实际情况，如地貌形态多样，生物资源异常丰富，气候、植被、土壤呈明显垂直变化，我们对其分区如下：河谷和沟谷农田乡村区——接近自然的生态旅游；落叶阔叶林区——亲近自然的生态旅游；针阔叶混交林区——返回自然的生态旅游；寒温性针叶林和亚高山灌丛草甸区——回归大自然的生态旅游。

2. 科学的功能分区

不同的旅游活动对环境的破坏力不同，为减少旅游活动对景区环境的不利影响，旅游地的规划必须依据旅游资源保护和游憩开发潜力的分析结果，通过科学的功能分区规划，将景区内各旅游景观的用地性质与游憩方式密切对应，以利于进一步与开发强度挂

钩，将保护落到实处。

在功能分区方面，国家公园的分区体系颇具参考价值，典型的有 IUCN 分区模式和美国分区模式两种。

(1) IUCN 分区模式

依据 1972 年 IUCN 的联合国国家公园手册中的分区制度，IUCN 分区模式共分为 3 大类 8 种分区，并就区内的游憩利用方式分别进行了规定。

1) 保护性自然区(protected natural areas)。保护性自然区系为保护自然生物群落及其相关的景观特征而划定的地区，仅允许开展不会干扰此类群落得到长期保护的活动，共包括 3 个分区：① 绝对自然区(strict natural area)。此区内的自然作用任其进行而不受任何人为干扰，以供科学研究、景观欣赏，并对其他分区产生有利影响。② 治理自然区(managed natural area)。为保护某种动植物、生物群落或地理环境特色而划定的，可通过人为干预保持其适宜的生存状态的地区。③ 旷野区(wildness area)。保护区内，在洪荒旷野状态和原有动植物自然繁衍的前提下，可为少数具有在野外徒步旅行能力的人提供无任何服务设施的游憩机会。

2) 保护性人类学区(protected anthropological areas)。为维护人类某些古老的生活方式，使其避免因工业文明及现代工程而消失所划定的地区，包括 3 个分区：① 自然生活区(natural biotic areas)。本区内人类仅为自然界的一个因子，无大面积耕作，不严重影响野生动植物的生存，原则上不准游客访问，但不一定排斥局部小区域的观光旅游开发。② 田园景观区(country landscape areas)。为保护古代农耕所形成的景观区域，具有人类学和遗传生物学价值，可适当规划开发观光用地。③ 特殊价值区(site of special interest)。为保护足以证明人类进化或远古人类生存的地区而划定的，视其具体的保护与管理条件而定是否可进行观光开发。

3) 保护性历史或考古区(protected historical or archeological areas)。为保护具有历史或考古学价值的古建筑、纪念物、传统聚落及市镇等而划定的区域，可配合发展观光旅游，包括两个分区：① 考古区(archeological site)。为人类过去的居住地，足以反映人类文明发展的过程，可能现在仍为人类居住地区的一部分。② 史迹区(historical site)。为保护近代人类活动迹象而划定的区域，通常为乡村及市镇等当地人居住的地区，但采取特别措施以保存其中具有历史价值的特色与资产。

(2) 美国分区模式

美国国家公园早先采用自然与游憩两大分区法，即中央地区保存原有自然状态，而周边地区可设置游客中心、员工宿舍及各种维护设施。后来随着保护地区周边设置缓冲区理论的发展，又演变为三分法分区，即在周边游憩区与核心自然保护区之间形成一带状缓冲区，旨在保护核心区的微气候、地质、化学等自然条件，并抵挡人为的直接冲击，具有非常重要的保护意义。

在这一分区观念指导下，1958 年美国户外游憩局拟定了六分区模式(ORRRC System)(表 7-11)，后美国国家公园管理署在其规划手册(Planning Process Guideline NPS-2 1982)中修正为四大分区(zone)及若干次区(sub-zone)，即自然区(natural zone)、史迹区(historical zone)、公园发展区(park developmental zone)、特别使用区(special use

zone)。这一分区模式是目前各国分区制度中最完整的，与 IUCN 分区模式相比，它在游憩利用控制方面的可操作性显然更强，与地方性经济活动的结合更为紧密，故对旅游区的分区规划更具有借鉴意义。

表 7-11　美国 ORRRC System 分区模式

	类别	位置	开发程度	游憩活动	景观特征
I	高密度游憩区	都市内，但也可以是国家公园内的一部分	高度开发，完全以游憩活动为目的	活动性强的运动及游戏	充满吸引力、自然的或人为的景观
II	一般户外游憩区	比 I 区偏远	开发程度较 I 区稍低，包括野餐区、露营区及人工设施如旅馆、商店等	范围广泛，如钓鱼、水上运动、游戏等	充满吸引力、自然的或人为的景观
III	自然区	比 I、II 区更偏远，面积更大	有限的开发，如道路、步道、露营、野餐设施等，采用目标经营方式	活动与自然环境有关，如露营、健行、划船、打猎等	自然的、有吸引力的环境，多样性的地形、湖泊
IV	特殊自然区	任何有特殊景观的地区	非常有限的开发，如步道、小径等	研究自然现象、景观	杰出的自然景观，科学性、地质性景观，经常为一个大区域内的小分区
V	原始地区	中央保护地	没有开发行为，或仅有步道，必要时设有汽车道	原野地，健行、露营等	自然的、原野的、未开发的，远离文明
VI	历史与文化古迹区	历史文化资源存在的地方	有限的开发，如小径及解说服务中心	观景、研究	具有与历史、文化等兴趣相符的特性，具国家、区域或地方代表性

引自 ORRRC　1962

上述两种功能分区模式尽管有所差异，但它的提出无疑具有重要意义。功能分区的模式是设计、开发和控制的有效工具，具有双重目的，即既实现了保护资源的目的，又满足了发展旅游的需求。因此，自它被提出以来，便迅速得到旅游学界、景观规划学界的学者、设计师等实践工作者们的认可。如景观设计师 Forster 倡导同心圆式的利用模式，将国家公园从里到外分成核心保护区、游憩缓冲区和密集游憩区。Gunn 提出了国家公园旅游模式，将公园分成重点资源保护区、低利用荒野区、分散游憩区、密集游憩区和服务社区。总之，功能分区的模式不仅能够使旅游区得到优化利用，并保护了自然资源，而且便于管理人员根据游客的需要对其加以分流。显然，它的提出对旅游业的管理具有重要的意义。

每个旅游区都有其自身的实际情况，因而他们的功能分区不应追求统一的模式，应具体问题具体解决，比如为更好地保护资源，可以有多个核心区。但是规划方案都应该体现这一基本思路，都应该根据资源保护和游憩方式的潜在影响来适当分区。

3. 旅游地的结构设计

功能分区是对整个旅游区的功能进行了一个划分，它的模式仅仅是从宏观的角度给我们提供了一种规划思路。每个功能区又是由较低一级的旅游景观所组成，这些旅游景观有机地连接成一个整体，发挥着自身的功能，即形成一定的生态系统，进行着特定的

生态过程。任何一个旅游景观都有一定的承载范围，超出其阈值，便会带来整个生态系统的失衡。也就是说，任何一个功能区的景观资源都需要保护，都不能无限制地被利用。如何保护这些旅游景观，如何协调任何一个次一级的生态系统的运行，这就需要我们从旅游景观的结构入手。

生态系统中的结构与功能的关系极为密切。结构是功能发挥的前提，功能是结构作用的再现。协调有序的结构能够保证功能的有效发挥。旅游地的每个小区要充分发挥自己的功能，就必须协调好自身的结构。设计旅游地的结构，我们应该借鉴景观生态学的知识。

针对每一种景观类型在其内部考虑资源保护，进行有详细差别的“分地段”具体规划，必须具有怎样根据处境划分地段，以及在地段内如何进行规划设计的“地段地理学”概念。结合生态学和地段地理学两方面研究基础的“景观生态学”，可以为“分地段”保护生态系统多样性，进而为保护旅游资源提供相应的理论基础。与此同时，对规划设计措施，可把广大地面生态系统背景视为“基”，而把道路视为“廊道”，旅游景观、接待服务设施基地和人工景点等视为“斑”，即可根据“分地段”保护的要求，对“廊道”和“斑’定出严格的控制要求。在具体规划时，形成“斑”、“廊道”、“基”的排列图式后，还必须从景观生态学角度考虑规划区内各种“地段”的生态系统的关系。总之，这种旅游规划设计的深层次分析，使旅游规划不只具有可操作性，而且是在科学理论与实证规范化结合指导下进行的，具有深层次的理论论证，开拓了旅游规划的一个新方向。

第六节　旅游地的管理

对于一个旅游地来说，良好的规划设计固然相当重要，但它仅仅是一个文本而已。旅游地的管理不仅需要开发者、管理者、旅游者等旅游主体认真贯彻执行本景区的规划设计，而且需要这些旅游主体承担相应的责任和义务。

一、旅游地的管理目标与策略

为了确保各旅游主体在旅游活动中均获得可持续的利益，为了保证旅游地的旅游与环境之间的协调共生关系，景区管理部门应当确定旅游的管理目标及采取合理的策略。要对景区进行有效管理，首先必须有科学的管理总目标，这个总目标应至少包括两方面：① 提供旅游者满意的愉悦旅游经历；② 将旅游者对环境的破坏程度控制到最小。这个管理总目标其实就是景区规划设计的文本精神的再现。

为达到管理目标，应当在旅游区建立一个旅游管理战略体系，该战略体系建立程序为：① 评估当前旅游形势；② 确定旅游的预期情境；③ 基于旅游需求的种类与类型制定管理策略计划；④ 制定一个正式的旅游管理策略文本；⑤ 实施与反馈修正。管理的关键因素包括有建立不同的管理区、进行景区旅游特征分析、完善宣传讲解系统、建立完善的服务设施及相应的价格体系和建立自筹经费机制。由于旅游生态学强调保护旅游资源的特点，所以应比较偏重旅游区环境管理的研究。环境管理的一个基本原则是了

解旅游地或旅游吸引物的容量并注意开发的限度，另一基本原则是建设足够的基础设施，以满足旅游者及当地居民的需求。为此要用现代技术和方法建立旅游生态管理机制。

对进入旅游区的游客，要采取各种有效的方法和技术，实施生态环境意识教育。在一定程度上，游客生态环境意识的增强，是旅游目的地保持良好旅游环境的关键条件。为实现这一目的，可在以下几方面进行操作：① 在旅游区内设立具有环境教育功能的基础设施，如关于生态环境景观的相应科学解说系统，提醒游客注意环境卫生的指示牌，方便并与环境协调的废物收集系统等；② 利用多种媒体，使旅游者接受多渠道的环境保护意识教育(包括门票、导游图、导游册上添加的生态知识和注意事项)；③ 增强旅游商品中的生态产品(含天然食品、饮品)；④ 一定的处罚手段。另外，应对游客大力提倡“取走的只有照片，留下的只有脚印”，并且在游客进入旅游区时即发放印有上述口号的废品收集袋，出门时要把此种收集袋交还。

二、旅游地管理的要求

1. 旅游地对经营者的要求

1) 旅游活动组织者应有高度的环境责任心。在旅游活动的安排和旅游线路的设计上，尽量使旅游活动对环境的影响最小；旅游设施尽量采用环保产品；在出游前对游客、导游及其他工作人员进行环境知识培训。

2) 导游应该有较高的文化素养和强烈的责任心。一般而言，游客对旅游资源有较强的求知欲。导游人员必须在经过专门培训后，对自己负责的旅游线路上的各种自然现象和社会现象做出较科学的分析，能诱导、启发游客探索历史文化、生态环境奥秘的兴趣，激发游客热爱自然、保护旅游资源的热情。另外，导游要敢于及时劝阻游客中对环境的不良行为。导游应该获得导游资格，必须接受三年以上的理科高等教育，并接受一个月的强化培训。

2. 旅游地对游客的要求

1) 游客的出游动机应该带有明确的生态环境意识和强烈的自我教育意识。游客在旅游地除了观光、放松情绪或精神之外，更应带着对旅游资源的欣赏、品味和探索的目的来出游，应该主动了解旅游地的天文地理知识、人文生态和自然生态知识，开阔视野。同时，旅游者对自身要有高度的自我约束，成为一个高尚的旅游者。

2) 游客在旅游中的行为应符合环保规范。游客在整个旅游活动中，应自始至终自觉地听从导游人员的指挥，遵守环保规范，不得有破坏环境的行为。

三、旅游地的管理与社区发展

社区政治、经济、文化的稳定繁荣是旅游业可持续发展的基础条件。为此，旅游地的发展必须发挥社区所具有的、提供给旅游业的基础潜能，应当把社区作为旅游业的一个组合元素来发展。社区群众参与旅游经营，既可以增强旅游区原汁原味的文化氛

围，又可消除社区群众与游客的隔阂，增进感情交流。从而既可保障旅游地旅游秩序的稳定，又可增强社区的综合势力，真正地发挥其基础作用。

大多数旅游区都位于农村。长期以来，农村旅游资源之所以还未被开发利用，只是因为社区人们并没有意识到这一点。地方政府和开发商应当积极引导社区人们充分认识自己所具有的资源潜力，使之服务于旅游业。如旅游农业就是适应时代要求，以大农业资源为依托而发展起来的一种特殊旅游活动。主要包括：农村独特的田园风光和人文景观；农村民俗和风土人情；引导游客参与农事劳作。这样一方面既充分利用了农村各种资源(包括人力资源)，也切实使人们受益于旅游业，改善了人们的生活水平，从而增强社区人们发展旅游的信心；另一方面也缓解了旅游业的“燃眉之急”，消除旅游淡旺季反差悬殊的负面效应。如为保证旅馆或招待所全年的高开房率，其规模不宜太大。这样旅游旺季，可以利用社区人们的空闲房屋，解决游客住宿问题；淡季时，可以保持旅馆正常的开房率，解决其惨淡经营的局面。

至于如何积极引导群众参与旅游业，则应吸取先进景区的经验。首先采取动员参与和让利于民的方针。动员参与指采取动员、启发、开导、典型带动等方式，鼓励群众利用现有条件开展旅游经营，兴办家庭旅馆，参与景区运输和加工出售当地土特产品；让利于民指对初步从办旅游中受益的群众给于继续扶持。其次是完善管理。对于抢拉游客，敲诈勒索，强行兜售，甚至殴打游客，出售伪劣商品等不法现象，应根据市场发展规律，加强法制教育，依法管理。一方面向群众大讲文明经商，吸引回头客的好处，讲清楚发展旅游与群众切身利益的关系及违法经营的危害，增强守法观念。另一方面应不断完善规章制度，引导村民制定《村民自治章程》，经村民代表大会通过，成为具有法律性的规章，让群众自我约束，自己教育自己。最后还应加强“软件”建设，主要是定期培训，提高管理水平；其次应珍爱家园，从自身做起，认识到保护旅游资源就是保护他们的长远利益。

四、旅游地的产业取向

旅游地的产业是服务于旅游者的，旅游者在开展旅游活动时，需要旅游地提供方便舒适的衣、食、住、行服务。因此，旅游区应设法使其服务产业生态化。

1. 生态服装

“生态时装”是为了避免一些服装、面料对人体及大自然的危害，在服装设计方面加强生态意识。衣服的图案取材于大自然，还要选用植物作染料和没有经过化学加工的布料。在制衣过程中，减少使用有毒的化学物质，衣服还能进行生物分解。

2. 生态饭店

供应旅游地植物园自己生产、加工的植物类食品。植物园内的菜园，除了种植各种食用的植物，还种植各种调味用的芳香类植物和食用菌。饭店提供的植物食品能满足人体所需的各种营养，对人体的健康十分的有利。饭店的废弃物可直接作为动物园的饲料或植物园的肥料。

3. 生态旅馆

旅馆四周布满树木花草，使游人能够听到大自然的呼吸，享受自然生态风光。同时旅馆的建筑材料可部分地利用再生原料。旅馆提供的用品尽量不含化学物质，如不含酸的信纸、床单、毛巾等是用在种植过程中未曾使用过化肥和化学杀虫剂的棉花或亚麻制成；肥皂可用植物油炼制；电子过滤系统清除自来水中的氯化物和有毒微生物。客房内装配香味发生器，根据客人的要求，随时向房间内释放出果香味和花香。旅馆的废水可直接用于浇灌植物园，粪便可集中收集制作沼气，沼气再用于照明，沼气渣用于植物园的肥料。

4. 生态商店

生态商店专营各种天然食品、饮料、化妆品、纯棉服装、手工艺品及有关生态环境保护的书籍和小型技术设备。店里的所有商品都有天然原料制成，不含任何化学成分。

5. 生态交通

在旅游地及其附近要求使用太阳能驱动或电能驱动的小车和自行车作为交通工具， 或者要求旅行者以步代车。禁止使用有害于环境和干扰生物栖息的其他交通工具。

上述旅游产业的取向是发展旅游业应考虑的方方面面。针对具体的旅游地，应该根据自身的特点选择相应的适合本地区的旅游产业。

第七节　旅游环境的保护

旅游环境的保护是旅游生态学研究的重要内容。旅游环境的保护不仅仅需要有好的规划设计、各旅游主体承担相应的责任和义务，更为关键的是，旅游管理者应深入领会、贯彻旅游环境承载力的内涵和操作，真正地把旅游环境承载力作为一种有效的规划和管理工具予以运用。旅游环境承载力表征着旅游地的环境和设施对旅游活动量的限制程度，以及所要保证的旅游者体验的性质和质量。由此可见，旅游环境承载力与旅游量密切相关，并且二者成为旅游地旅游环境是否能够保持良好的重要指标。任何一个旅游地一旦规划方案确定后，它的旅游环境承载力也就基本固定下来，因而旅游量也便成为相对的变量，成为旅游地日常管理中的主要调控指标。

一、旅游的饱和与超载

在理论上，旅游地域和场所(可以是旅游景点、景区、旅游地、旅游区域或旅游设施)承受的旅游流量或活动量达到其极限容量，称之为旅游饱和。而一旦超出极限容量值， 即是旅游超载。在日常的旅游管理工作中，有时视旅游地域接待的旅游流量达到其合理容量为饱和，越过合理容量值为超载。旅游超载必然导致旅游污染或拥挤。例如，旅游地域长期连续地或间歇地饱和与超载，其结果将是旅游资源被破坏、旅游地域

的生态系统遭到损伤、旅游者与旅游地域居民的和谐关系破裂。

根据旅游饱和与超载发生的时间和空间特点，可以将其分为如下几种情况：

1. 周期性饱和与超载和偶发性饱和与超载

周期性饱和与超载就是季节性饱和与超载，这是旅游饱和与超载中最为常见的现象。它导源于人类社会具有周期性规律的社会经济生活及自然气候的周期性变化。偶发性饱和与超载常是由于旅游地或其附近发生了偶然性的事件，这些事件在较短时间内吸引来大量旅游者。在一般情况下，偶发性的饱和与超载造成的环境影响易于消除，而周期性的饱和与超载则是一个危险信号：旅游对于环境的影响在不立即采取应对措施的情况下，可能造成无法挽回的、毁灭性的损失。

2. 长期连续性饱和与超载和短期性饱和与超载

在实际中，短期性饱和与超载的现象占绝大多数，它又分为周期性与偶发性两种情况，如上所述。长期连续性旅游饱和与超载的情况多发生在大城市内或城市郊区，并且主要发生在文化古迹景区或其他的人工旅游景物场所。为了保护旅游资源和保持旅游的环境质量，通常的做法是，在发生长期连续性旅游饱和与超载的地域，实行严格的旅游分流和管理措施。

3. 空间上的整体性饱和与超载和局部性饱和与超载

这里所指的空间范围，可以是旅游地或包含有若干旅游地的旅游区域。旅游地的局部性饱和与超载，是指部分景区承受的旅游活动量已超出景区的承载力，而另外的景区并未饱和。在大多数情况下，整个旅游地承受的旅游活动量都未超出旅游地的承载力值。这是旅游饱和与超载中最常见的现象。由于表面上旅游流量并未达到旅游地的承载力值，因此局部性饱和与超载对于管理人员具有很强的虚假性。而事实上，部分景区饱和与超载导致的旅游对于环境的消极影响已经开始。旅游地的整体性饱和与超载则指所有景区和设施承受的旅游活动量皆已超出各自的承载力值。旅游区域的局部性饱和与超载指区域中部分旅游地旅游流量已达到与超出其承载力值，整体性饱和与超载则意味着区域内各旅游地皆人满为患，已无剩余的容纳能力。

二、旅游饱和与超载的对策

由于旅游饱和与超载常常导致严重的环境后果，对旅游业本身产生很大的消极影响，因此，设法消除旅游饱和与超载成为旅游管理和规划中的重要工作。在旅游管理和规划中，解决旅游饱和与超载的措施分为两个方面：

第一，从旅游需求角度，减低旅游旺季的高峰流量，使旺季的旅游流量在旅游地的承载力之内。采取的有效方法，一般是通过大众传播媒介，向潜在的旅游者陈述已经发生过的旅游超载现象及其环境后果，并预测当年旺季可能出现的旅游流量和超载情况，从而影响旅游者选择旅游目的地的决策行为。

第二，提高旅游供给能力，或调控旅游供给的内部结构并辅之以对旅游需求的引导

措施。这一方法的着眼点，在于对旅游者实行空间上的分流。

旅游地的局部性超载分为两种情况，对应的则有不同的空间分流措施。第一种情况，是旅游地内的部分景区超载，而其他景区并未达到饱和，这些景区的剩余容量完全可以满足超载景区超载部分的旅游量。相应的旅游空间分流措施为内部分流，即在超载景区入口地段设置限流设施，一旦景区达到饱和，则停止进入。或在景区入口地段，根据景区内旅游流量与景区容量值的差值情况(尚未饱和)，收取附加的景区使用费，旅游流量越接近景区的容量值，收费越高，一旦饱和也停止进入。第二种情况，是景区内部空间分流之后仍然超载。在这种情况下，如果旅游地容量仍有扩大的潜力，则应当尽快予以扩建。如果旅游地已无扩建潜力或扩建后仍不能避免超载，则必须采取与旅游地的整体性超载同样的外部空间分流措施。

旅游地整体性超载事实上也即旅游区域的局部性超载或旅游区域的整体性超载，相应采取的是“排斥”与“吸引”并行的外部空间分流措施：“排斥”即采取经济办法并利用大众传播媒介，将潜在的旅游者部分地从即将整体性超载的旅游地或旅游区域排斥走。具体作法，是允许或以立法的形式要求旅游地的经营者提高价格，如门票、食宿、交通等等费用，直到不再出现整体性超载，并在传播媒介中予以传播。“吸引”则指利用价格、媒介及地理上的邻近性等，将潜在的以超载旅游目的地为目的的游客吸引到未饱和的旅游地去，或建立新的旅游地吸引游客。一个鲜为人知的旅游地，只要其本身的质量具有较高的吸引力，加之区位适当、价格较廉，完全可以通过推销工作迅速吸引大量游客。旅游区域的整体性超载，只有靠扩大旅游供给能力，即开发建设新的旅游地来解决。在诸多类型的新旅游地中，以利用介入机会(替代性)所开发的新旅游地，对已超载的旅游地具有最为明显的空间分流效果。因此，在决定新旅游地开发的顺序时，具有介入特性的旅游地应为首选目标。

第八章　环境生态学

环境生态学是现代生态学的重要内容，又是环境科学的组成部分，理解人为干扰与生态系统内在的变化机理、规律之间的相互作用关系，是环境生态学的关键。环境生态学的应用十分广泛，最突出的包括环境污染治理的生态对策、生态环境质量评价、环境生态设计及环境生态工程，对于保护和合理利用自然资源，治理污染，恢复被破坏的生态环境起着越来越大的作用。现代环境生态学是一门新兴的、正在深入开拓和迅速发展中的学科。本章在总结该学科最近 20 多年来的发展基础上，概括地介绍环境生态学中的基本理论和应用技术。

第一节　环境生态学的概念及研究内容

一、环境生态学的概念

环境生态学(environmental ecology)是研究人为干扰下，生态系统内在的变化机理、规律和对人类的反效应，寻求受损生态系统恢复、重建和保护对策的科学。即运用生态学理论，阐明人与环境间的相互作用及解决环境问题的生态途径。所以，环境生态学不同于以研究生物与其生存环境之间相互关系为主的经典生态学。

二、环境生态学的研究内容

环境生态学属于自然科学的范畴。根据其定义，该学科的内容主要包括以下几个方面：

(一) 人为干扰下生态系统内在变化机理和规律

自然生态系统受到人为的干扰后，将会产生一系列的反应和变化。在这一过程中，有哪些内在规律，干扰效应在系统内不同组分间是如何相互作用的；出现了哪些生态效应以及如何影响到人类，包括各种污染物在各类生态系统中的行为变化规律和危害方式。

(二) 生态系统受损程度的判断

物理、化学和生态学分析方法是环境质量评价和预测所常用的三个基本的手段，科

学的评价应该是三者的结合，而生态学判断所需的大量信息就是来自生态监测和环境监测。生态监测就是利用生态系统生物群落各组分对干扰效应的应答来分析环境变化的效应程度和范围，包括人为干扰下的种群动态和群落演替过程；环境监测主要是用物理和化学的方法监测污染物的变化。

(三) 各类生态系统的功能和保护措施的研究

各类生态系统在生物圈中执行着不同的功能，被破坏后产生的生态效应亦不同。环境生态学要研究各类生态系统受损后的危害效应及方式，各类生态系统的保护对策，包括生物资源的保护和科学管理，受损生态系统的恢复，重建的措施等。

(四) 解决生态问题的环境对策

采用生态学方法治理环境污染和生态破坏问题，尤其在区域环境的综合整治上已初见成效，前景令人鼓舞。依据环境问题的特点采取适当的生态学对策，并辅之以其他方法来改善和恢复恶化的环境质量，是环境生态学的研究内容之一。包括各种废物的处理和资源化的技术等。

综上可以看出，维护生物圈的正常功能，改造人类生存环境，并使两者间得到协调发展，这是环境生态学的根本目的。运用生态学理论，保护和合理利用自然资源，治理被污染和破坏的生态环境，以满足人类生存发展的需要是环境生态学的主要任务。

第二节　人类所面临的主要环境问题

人类所居住的地球从形成到现在已经历了大约 46 亿年的漫长岁月或者更长的时间。 地球环境在各种自然力的作用下，一直不断地发生着各种相对缓慢的变化，无论是气候变迁还是造山运动，都对地球的面貌进行了改变。然而，自从人类出现以来，人为因素和自然因素的交互影响和叠加作用已使得地球环境发生了并正在发生着巨大的变化，其速度与规模都是前所未有的。从大气圈、水圈、岩石圈到生物圈，人类不仅改变了空气的质量，也改变了 CO_2-O_2 的平衡和水、氮、磷等物质的循环和能量流动，严重干扰了地球上几乎每一块陆地上动植物的生存环境与分布状态，甚至影响到人类自身的生理和生活状态。可以说，从最偏僻的地球角落到最遥远的太空，都会感知到人类的深刻影响。概括起来讲，当前人类所面临的主要环境问题主要表现在四大方面，即：全球环境变化、人口剧增、资源短缺和环境污染(毛文永　1993)。

一、全球环境变化

(一) 全球气候变暖与海平面上升

全球气候变暖及其效应已成为近年来人们最为关注的环境问题之一。据有关资料表明，近一万多年来，地球年平均气温的变化不超过2℃。在19世纪初，世界开始大规模工业化之前，大气中的二氧化碳浓度相对稳定，大体保持在 28μg/g(按体积计算)。随着工业革命的兴起，能源和工业生产的发展，人类大量使用石油、煤和天然气等化石燃料，释放到大气中的二氧化碳等气体的含量愈来愈多。1992 年，全球二氧化碳的排放 264 亿 t，其中 84%(约 223 亿 t)是来自工业活动。过去 20 年间，工业活动的排放上升了 38%。

目前，全世界的工厂和电厂每年向大气排放的二氧化碳有 50 多亿吨，大气中二氧化碳含量的年增长率约为 0.4%。大气中的水汽、二氧化碳及甲烷、氧化亚氮、氟氯烃等气体的大量聚集，可以吸收某些从地球表面向外辐射的长波辐射热，并将其反射回地面，对地面起到增温作用，出现“温室效应”。据科学家们估计，按照目前的速率，到2030~2050 年，大气中二氧化碳的含量将比工业革命之前增加 1 倍，高达 550 μg/g 以上，全球气候将变暖，带来全球性的环境灾难，它将会导致海水变暖和膨胀，加速极地冰川和冻土的融化，造成海平面上升等等。美国环保局的资料认为，如果温室气体继续按目前的情况释放，估计到 2025 年，海平面将上升 10~40cm ，到 2100 年，将上升60~200cm，现在 30%~80%的沿海沼泽和许多地势低洼的岛屿将可能被海水淹没；目前世界上大约有 1/3 的人口生活在海岸线 60km 的范围内，如果全球变暖，海平面升高，一些城市和乡村可能被淹没。此外，由于气候异常，旱涝灾害的次数可能增加，森林、草原火灾增多，水资源问题将更为突出，对农业影响也将十分明显。

(二) 臭氧层损耗

臭氧(O_3)是大气中的微量元素，是一种具微腥臭味、浅蓝色的气体，主要密集在离地面 25~30km 的平流层内，科学家称之为臭氧层(图 8-1)。臭氧层具有吸收紫外线的功能，阻挡了太阳 99%的紫外线辐射，从而保护了地球上的生命。据美国宇航局观测的资料，自 1969 年以来，全球除赤道以外，所有地区臭氧层中臭氧的含量减少了3%~5%，全球臭氧层都已受到损害，横跨美、加、日、中、前苏联和西欧部分国家的宽广地带的臭氧层已减少了 3%，在极地臭氧层损害更为严重，已出现臭氧空洞。

臭氧层损耗所带来的后果是十分严重的，对人类及其生存环境将造成极为不利的生态灾难。医学界认为，大气中的臭氧每减少 1%，照射到地球表面的紫外线就会增加2 %，人类皮肤癌的发病率就会增加 7%，白内障患者就会增加 6%。紫外线辐射增强对动植物的生存也是灾难性的。它将打乱生态系统中复杂的食物链和食物网，导致一些主要生物物种的灭绝，会破坏植物的光合作用和授粉能力，对小麦、水稻、豆类作物的生长结果产生有害影响，降低产量。它可使地球上 2/3 农作物减产，从而导致粮食危机。

破坏臭氧层的主要原因还是人类活动。人类在使用冷冻剂、消毒剂和灭火剂等化学制品时，向大气排放出大量的氟氯烃气体和哈龙(包括 5 种氟氯烃类物质和 3 种卤代烃物质)。氟氯烃气体一经释放，就会慢慢上升到地球大气圈的臭氧层顶部。在那里，紫外线会把氟氯烃中的氯原子分解出来，氯原子再把臭氧中的一个氧原子夺去，使臭氧变成氧，使其丧失吸收紫外线的能力。

破坏臭氧层的第二个原因是在对流层顶部飞行的飞机排出的氧化氮等气体，这些气体可充当破坏臭氧层的催化剂。

破坏臭氧层的第三个原因是农业上无控制地使用化肥而产生的大量氧化氮，各种燃料的燃烧也会产生大量氧化氮，这些物质都是破坏臭氧层的因素。另外还有人认为核试验也是影响臭氧层的因素。

近年来，全世界的科学家都在呼吁：拯救臭氧层，禁止使用氟氯烃。1985 年 3 月，美国、前苏联、日本、加拿大等 20 多个国家签署了《保护臭氧层国际公约》。1987 年 9 月，24 个国家在加拿大蒙特利尔签订该公约的《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔协议书》，该协议书规定签字国在 20 世纪末把氟氯烃的使用量减少到 1986 年水平的一半。1989 年 3 月 5 日，联合国环境规划署在伦敦召开了保护臭氧层的国际会议，有 113 个国家和地区出席了会议，再次向全世界发出了“拯救臭氧层”的倡议。发达国家已同意到 20 世纪末完全停止生产和使用氟氯烃类物质。但当今世界上，从灭火器、冰箱、冷冻机到计算机和汽车等都离不开氟氯烃，要全面禁止使用氟氯烃类物质是十分困难的，因此，开发研制新的代用品势在必行。科学家们指出，即使现在立即全面禁止使用氟氯烃，也需要多达 100 多年的时间才能弥补已遭破坏的臭氧层。可见，保护臭氧层是一个迫在眉睫的世界性环境问题，需要全人类的共同努力。

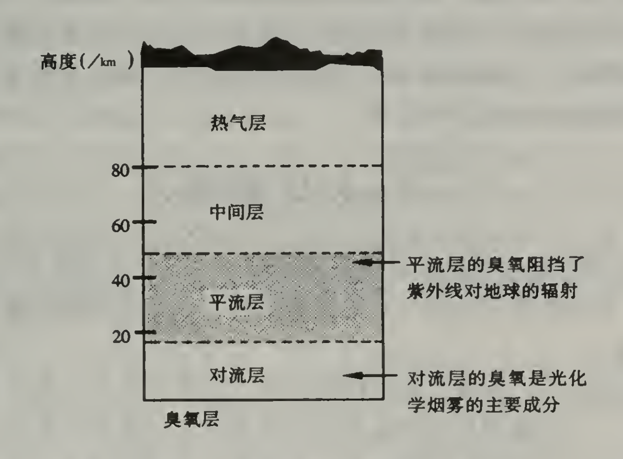


图 8-1　臭氧层的结构(贾灵等　1998)

(三) 酸 雨 蔓 延

酸雨蔓延是全球变化的又一大表现。酸雨是一种严重的污染物质，含有多种无机酸和有机酸，绝大部分是硫酸和硝酸。酸雨的成因是一种复杂的大气化学和大气物理现

象。主要因素是工业生产、民用燃料排放出来的二氧化硫，燃烧石油及汽车尾气排放出来的氮氧化物等进入大气后，经过“云内成雨过程”和“云下冲刷过程”，形成较大的酸雨雨滴，最后降落在地面上。

从 20 世纪 60 年代开始，酸雨的酸度越来越高，对人类的危害也越来越大，发现酸雨的地方也越来越多。酸雨蔓延成为人们普遍关注的全球性环境问题。近些年来，随着工业的发展，矿物燃料消耗量的增加，各国向大气中排放的二氧化硫和氮氧化物含量直线上升。我国的能源结构主要是煤炭，也是二氧化硫和二氧化氮气体的排放大国和受害国，每年排放的二氧化硫大约在 1500 万 t 以上，是少数几个排放量大的国家之一。近年来，随着我国能源工业和社会经济的发展，重酸雨区有迅速扩展之势，不仅城市地区降水酸度逐年递增，而且全国大部分地区降水酸度普遍增加。

酸雨对生态系统的影响很大，它可以直接使大片森林死亡、农作物枯萎，也会抑制土壤中有机物的分解和氮的固定，淋洗与土壤粒子结合的钙、镁、钾等营养元素，使土壤贫瘠化；酸雨可以使湖泊河流酸化，并溶解土壤和水体底泥中的重金属进入水中，毒害鱼类，使水生生态系统受到严重破坏，对人体健康也有直接的和潜在的影响。很多国家由于酸雨而出现了酸湖。水体酸化还会导致水生生物的组成结构发生变化，耐酸的藻类、真菌增多，而有根植物和脊椎动物减少。

酸雨危害的情况已经引起国际上各方面的注意。在 1972 年，斯德哥尔摩联合国首届人类环境会议上，瑞典首次把酸雨作为国际问题提出来。1982 年，人类环境国际会议又把酸雨作为一个重要问题提出来，同年 6 月，在瑞典斯德哥尔摩还专门召开了有 33 国代表参加的酸雨问题国际会议。有些国家还采取一系列对策，防治酸雨的发生和蔓延。酸雨问题同样引起了我国政府的高度重视，拨出了专项资金，进行了全国性的酸雨监测和普查研究，寻求对策。但我国许多地区和城市都存在着产生酸雨危害的自然条件与人为因素，我们尚缺乏系统而可靠的科学资料和全民对环境的忧患意识，必须在当前注重发展经济的同时，加强环境保护，采取有效措施，限制二氧化硫和氮氧化物的排放量，以减少和消除酸雨的威胁与危害。

二、人口剧增

“人口剧增”问题是当代社会最重要的问题。人口迅速增长包括：① 人口数量的迅速增长；② 个人消费需求的增长。迅速增长的人口和消费需求增加了人类对地球生命维持系统的压力。

17 世纪产业革命后，随着工业时代的到来，人类产生了有史以来的第三次人口爆炸性增长(图 8-2)。人口激增是以掠夺非再生资源的工业发展产生的。这种人口激增是同世界从农业经济(以太阳能流为基础)到工业体系(以掠夺地球资本中非再生能源贮存为基础)变化完全一致的。当然，人口迅速增长还与其他许多因素有关，例如随着医疗保健事业的发展，婴儿死亡率降低了。随着死亡率下降以及人口基数增大，人口将进一步增长。

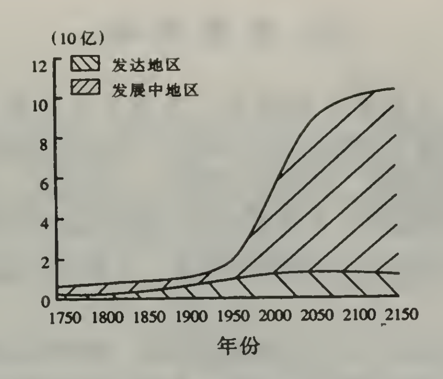


图 8-2　人口增长的趋势

对于“人口剧增”的问题，我们的看法是：

第一，人口增长过快是一个必须认真解决的问题。控制人口增长是当代人类的重要责任。人口增加必须开发土地、森林、草地和渔场，开发水资源，能源和地下矿藏，从而加剧人类对生态系统的压力。然而，地球表面的生态资源是有限的，迄今为止还看不到大规模向太空移民的可靠前景。因此必须控制人口过快增长，把它限制在地球生态系统承载能力的限度内。我国政府把控制人口作为我国的基本国策是完全正确的。

第二，人类不会被“人口的浪潮淹没”。因为人口问题不能单纯看它的数量，还要看到它的质量。人不仅是消费者而且是生产者，他能建造比自然生态系统有更高生产力的人工生态系统，为人类提供丰富的物质需要。虽然地球上的生态资源是有限的，但是物质和能量的形式是可以转化的，一旦人类自身有了需要，可以把各种物质和能量转化为资源，在这个意义上地球上的资源可供人类永续利用，达到可持续发展。特别是人类的智慧和力量，人有别于其他生物，他的有意识的能动作用，不仅可以规划自己的社会经济生产，而且能够规划自然界的生产，还能够规划自身的生产，能够有意识地把人口增长率限制在经济和自然资源允许的水平上。

第三，人口增长对生态系统的压力，除了人口数量过大的压力外，还有个人消费需求方面的原因。佩切伊指出，人口增长加上消费需求的增长使得人类对自然系统的压力直线上升，在 20 世纪的最后 25 年中，人类对于能源的需求等于人类 1975 年以前已经消耗掉的全部能源。这里提出的人口生态学问题是，合理地限制人类需要的问题，以及限制人类满足自己需要的手段问题。

第四，生态学对人口问题的意义是，人是生态系统的一部分，是重要的生态因子，他服从生态学所揭示的主要规律。虽然人的本质属性是他的社会性和生物性的统一，但是以生物规律为基础的生态规律对人类自身的生产及他的生存和发展仍然是适用的。因而，生态学规律对于我们正确地认识人口过程，从而制订科学的人口政策，在控制人口数量、提高人口素质、实施合理的人口分布等方面都具有重要意义。因此，协调人口、 经济、资源和环境的发展，既是人口生态学和环境生态学的重要思想，又是人类社会持续发展的重要途径。

三、资源短缺

由于世界范围内人口总量不断增加，生活水平不断提高，人类对资源的开发利用强度愈来愈高，造成了资源的匮乏与破坏。自然资源是指自然界中能被人类用于生产和生活的物质和能量的总称，例如生物资源、土地资源、水资源、矿产资源、气候资源、太阳能资源、风力资源等。自然资源是生态环境的组成要素，同时也是人类社会赖以生存和发展的基础。随着社会、经济的发展，人类对资源的需求一直都呈直线上升的趋势。

自然资源分为可更新资源与不可更新资源两类，前者如生物资源、土地资源和水资源等等，是可以更新的，但是更新再生需要一个相当长的时间和必要的条件；后者如矿产资源等，是在特定的历史条件下经历漫长的岁月而形成的，一旦被破坏和大量开采使用，其“存量”将愈来愈少直至耗竭，故被称为不可更新的资源。在资源的开发利用中，我们必须遵循以下两条原则：

① 对可再生性资源要保证其恢复、更新，实行永续利用；对不可再生性资源应最大限度地做到节约利用和循环重复利用，以延缓其耗竭的速度。

② 在开发和利用自然资源时，要充分注意这些资源在生态系统中的地位和作用，避免生态系统遭到破坏。否则，就会破坏自然环境，加速资源枯竭，导致生态失衡，给社会经济发展带来严重后果。

我国当前在资源开发利用中不同程度地存在着土地及森林资源急剧减少、生态功能退化、水土流失严重、水资源匮乏、矿产资源无序开发、生物多样性减少等问题，已成为我国经济、社会和环境协调发展的主要制约因素。

(一) 土地资源

土地资源是生态系统中最为宝贵的资源和人类及其他生物的栖息之地，是人类生产活动最基本的生产资料与生活资料。

随着人口逐渐增加，城市面积不断扩大，耕地面积随之按指数递减，造成用地紧张、人口密度增加的状况。

水土流失也使每年全世界损失约 300 万 hm^2 的土地，冲走的泥沙达 250 亿 t。我国水土流失量最严重的地区是黄土高原，面积达 4300 万 hm^2，占该区域总面积的 80%以上。

土地荒漠化是当前世界上又一最严重的环境危机。据联合国专家估计，全世界有3.5%以上的土地面积正处在沙漠化的直接威胁之下，每年有 210 万 hm^2 农田由于沙漠化而变得完全无用或近于无用状态，每年损失的农牧业产量价值达 260 亿美元。我国土壤沙化速度也很快、沙漠面积从 20 世纪 50 年代到现在几乎扩大了 1 倍，从 6667 万 hm^2 扩展到 13 000 万 hm^2，约占国土面积的 13.5%，还有近 670 万 hm^2 耕地和 1/3 的天然草场不同程度地受到沙漠化的威胁。

（二）淡水资源

地球上的水 97%以上是海水，陆地上的水不足 3%，其中大部分又以冰川的形式存储在两极，淡水资源不足 1%(表 8-1)。实际上人类利用的淡水资源只是降水形成的地面水与地下水，全球陆地面积的平均年降水量为 800mm，降水总量为 119 000km^3。

表 8-1　地球水量的估计

水资源	水量 /km^3	占总水量 /%
淡水湖	125 000	0.009
河流	1250	0.0001
土壤水和渗透水	67 000	0.005
地下水	8 350 000	0.61
盐湖和内陆海	104 000	0.008
冰盖和冰川	29 200 000	2.41
大气水分	13 000	0.001
海洋	1 370 000 000	97.3

人类利用的水资源主要是生活用水、农业用水、工业用水与内河航运用水。由于降水时空分布不均，世界上有 60%以上的地区缺水。随着人口的增加，城市化的加速，淡水紧缺已成为当前世界性的生态环境问题之一，将构成经济发展和粮食生产的制约因素。虽然从世界人均淡水量 8300m^3 的储量来看，仍可算丰富，但由于气候的自然变迁和难以预测的天气变化，使每年的径流量有将近 2/3 以洪水形式迅速流失，只有其余的 1/3 淡水较稳定，成为长年饮用和灌溉用水的可靠来源，人均 3000m^3 的可供水量是目前可再生淡水的极限值。

（三）森林资源

森林是生态系统中具有自净功能的重要组成部分，是生态系统的初级生产者。但是，随着人类社会的发展，森林的面积一直在减少。1 万年前，地球上森林的面积大约为 76 亿 hm^2，地球森林的覆盖率在 60%以上，20 世纪 90 年代初，全球 40%的土地面积已变成了耕地或永久性牧场，这种转变在很大程度上是以牺牲森林和草地为代价而实现的。现在全世界每年要砍伐密林 600~800 万 hm^2，疏林 400 万 hm^2。目前热带森林每年减少 1130 万 hm^2。

（四）生物多样性

世界上物种的总量据估计约为 1400 万种，目前已经鉴定的物种(包括动物、植物、微生物)约有 170 万种。但随着人类的影响愈来愈大，世界上的许多物种都受到了严重威胁。据世界资源研究所的推测认定，从 1975~2015 年期间，每 10 年间世界上就有 1%~11%的物种灭绝。其原因主要有非本地物种的引进、环境的破坏、狩猎和蓄意灭绝，而 1 种植物的灭绝又至少会影响到 20 种昆虫因食物链被破坏而消亡。

人类大规模的生产和生活活动，导致了物种灭绝的速度加快。科学家预言，如果热带雨林从地球上消失，则将有80%的植物和400万种物种随之消亡，人类活动已成为物种多样性减少的最主要原因。实际上，生态系统中有许多物种还未被发现与认识就从地球上永远消失了，这种损失给人类带来的后果是不可低估的。

沿海生态系统是海洋生物多样性最丰富的宝库之一，但据最新的资料显示，沿海生态系统正受到沿世界1/2海岸进行的开发活动的威胁。据估计，全球34%的沿海地区正处在潜在恶化的高度危险之中，另有17%处于中度危险中，大多数受到开发潜在威胁的沿海生态系统都位于北温带和北赤道区以内。威胁估计基于以下五项指标：① 人口超过10万的城市因沿海开发、排水和工业污染而带来的潜在威胁；② 主要港口因物种引进、石油泄漏和工业污染而带来的潜在威胁；③ 人口密度引起的沿海开发和污染的潜在威胁；④ 道路密度间接地为利用沿海资源以及沿海开发提供便利；⑤ 管道密度带来的石油污染和其他工业废物泄漏的潜在威胁。

四、环 境 污 染

自工业革命以来，特别是20世纪50年代以后，人类在科学技术上取得的许多重大突破，大大扩大和增强了人类发现自然、改造自然的能力，创造了前所未有的社会生产力。但同时人类对生态环境的破坏也空前增多。在全球范围内，特别是在一些重点城市地区，由于人口密集、交通拥挤、工业生产规模愈来愈大、能流物流高度集中，使得空气、水体、土壤、固体废弃物和噪声污染日益加剧。

20世纪50年代以后，工业“三废”排放量的增多和许多新污染物的出现，使得原来许多未被污染的领域也不能幸免，如航空航天技术的发展，使得高空大气层遭受污染；巨型油轮和海上钻井等的出现，使海洋污染日趋严重。总之，由于人类社会的影响，在当今地球上已很难找到一块洁净的绿洲了。

环境污染主要包括大气污染、水污染、土壤污染、固体废弃物污染和噪声污染等等(详见下一节)。

第三节　环境污染防治的生态对策

环境污染防治的生态对策是用生态学原理和工程学手段防治环境污染，保护人类生存环境的技术科学，因此，它是环境生态学的重要内容之一。

一、环境污染的概念及其防治措施

(一) 环境污染的概念

环境污染是指人类活动使环境要素或其状态发生变化，环境质量恶化，扰乱和破坏了生态系统的稳定性及人类的正常生活条件的现象。简而言之，环境因受人类活动影响而改变了原有性质或状态的现象称为环境污染。例如大气变污浊、水质变差、废弃物堆

积、噪声、振动、恶臭等对环境的破坏都属环境污染。由于环境污染，从而导致日照减弱， 气候异常，山野荒芜，土壤沙化、盐碱化，草原退化，水土流失，自然灾害频繁，生物物种绝灭等。环境污染的实质是人类活动中将大量的污染物排入环境，影响其自净能力， 降低了生态系统的功能。

环境污染物大体来自两个方面：一是来自人类的生产活动，使大量自然界原来不存在的人工合成的各种有机化合物(近 200 万种)，以及每天约有成亿吨的固体废弃物排入环境，严重影响了各自然要素之间的物质和能量的正常交换过程；另一方面是来自人类的生活活动，如生活污水、垃圾等，据计算，人在一生中(按 60 年计算)要从外界环境吸收 324t 空气、64t 水和 32.4t 食物，同时他也向环境排放数量大致相同的废弃物。环境污染物可分为气态、液态、固态及胶态四种状态，被污染的对象则为大气、水体、土壤及生物(包括人类)。

环境问题已成为世界各国的主要政治问题和社会问题；这些问题都是由于人们的行动违反自然规律所致；预料随着生产力的发展，人类大规模的深入地改造环境，也必将引起更复杂的新的环境问题。解决环境问题的根本途径是调节人类社会活动与环境的关系(Aarne 1975)。

(二) 环境污染的防治对策

环境污染的防治主要是解决从污染产生、发展，直至消除的全过程中存在的有关问题和采取防治的种种措施. 其最终目的是保护和改善人类生存的生态环境。污染防治对策包括单个污染源或污染物的防治，也包括区域污染的综合防治。根据治理对象的不同，它又可分为大气污染防治、水污染防治、固体废物处理与处置、噪声和振动控制、恶臭防治、土壤污染防治等；按照不同的防治方法，又可分为物理的、化学的和生物的防治方法。

二、水体污染与废水处理的生物对策

(一) 水体的自净作用及水体污染

1. 水体的自净作用

水体自净是指受污染的水体由于物理、化学、生物等方面的作用，使污染物浓度逐渐降低，经过一段时间后恢复到受污前的状态。这种现象从净化机制来看，可分为以下几类：

1) 物理净化。是指污染物质由于稀释、扩散、沉淀等作用而使河水污染物质浓度降低的过程。其中稀释作用是一项重要的物理净化过程。

2) 化学净化。是指污染物质由于氧化、还原、分解等作用而使河水污染物质浓度降低的过程。

3) 生物净化。由于水中生物活动，尤其是水中微生物对有机物的氧化分解作用而

引起的污染物质浓度降低的过程。

目前关于水体自净作用，主要研究水体中的有机污染物质因微生物的作用而发生的生物化学分解过程。

2. 水体污染

关于水污染的定义目前有三种：一是与水的自净作用相联系的，即认为水污染是指排人水体的污染物超过了水体的自净能力，从而使水质恶化的现象；二是指进人水体的外来物质含量超过了该物质在水体本底中的含量；三是指外来物质进人水体的数量达到了破坏水体原有用途的程度。在这些定义中以最后一种较为适用，因为这一定义将水污染与人类的生产和生活活动联系了起来，将水污染与水的用途紧密结合起来。

（二）水体中主要污染物的来源及影响

水体中的污染物概括地说可分为四大类：无机无毒物、无机有毒物、有机无毒物和有机有毒物。无机无毒物包括酸、碱及一般无机盐和氮、磷等植物营养物质；无机有毒物包括各类重金属（汞、镉、铅、铬)和氰化物、氟化物等；有机无毒物主要是指在水体中比较容易分解的有机化合物，如碳水化合物、脂肪、蛋白质等；有机有毒物主要为苯酚、多环芳烃和各种人工合成的具积累性的稳定有机化合物，如多氯联苯和有机农药等。有机物的污染特征是耗氧，有毒物的污染特征是生物毒性。

（三）水体污染的控制途径

水体的污染，主要是由于工业废水和城市污水的任意排放造成的。因此，要控制和进一步消除水的污染，必须从控制废水的排放人手，将防、治、管三者结合起来(王宝贞 1990)。有效地控制水体污染的基本途径有以下几个方面。

1. 减少污染源排放的工业废水量

减少污染源排放的工业废水量，并降低其废水浓度。事实证明，这方面潜力很大， 办法很多，只要认真去做，就能收到显著的效果。

1) 改革生产工艺。尽量不用水或少用水，尽量不用或少用易产生污染的原料、设备及生产工艺。如采用无水印染工艺，可消除印染废水的排放；采用无氰电镀工艺可使废水中不再含氰；又如早期的硬型合成洗涤剂在水体中难以降解，因而可以长期积累。近年来已研究出在水体中容易被生物降解的软型合成洗涤剂，它在水体中容易被生物分解，从而可减轻或消除洗涤剂的污染。

2) 重复利用废水。尽量采用重复用水及循环用水系统，使废水排放量减至最少。根据不同生产工艺对水质的不同要求，可将一工段排的废水送往另一段使用。实现一水二用或一水多用，即重复用水。如利用轻度污染废水作为锅炉的水力排渣用水或作为炼焦炉的熄焦用水。将生产废水经适当处理后，送回本工段再次利用，即循环用水。如高

炉煤气洗涤废水经沉淀、冷却后可再次用来洗涤高炉煤气，并可不断循环，只需补充少量的水补偿循环中的损失。

3) 回收有用产品。尽量使流失至废水中的原料和成品与水分离，就地回收，这样做既可减少生产成本，增加经济收益，又可大大降低废水浓度，减轻污水处理负担。如造纸废液碱度大、有机物浓度高，是一项重要的污染源。如能从中回收碱或二甲基亚砜等有用物质，即可变污染源为生产源。含酚浓度大于 1500~2000 mg/L 的废水，经萃取回收后，可使含酚浓度降至 100mg/L 左右，可从每立方米废水中回收近 2kg 酚，回收后的废水再送至生化处理装置进一步处理。

2. 妥善处理城市及工业废水

采用上述各项措施后，仍将有一定数量的工业废水和城市污水的排放，要达到“零排放”是需要花费极高经济代价的。

为了确保水体不受污染，必须在废水排入水体以前，对其进行妥善处理，使其实现无害化，不致影响水体的卫生性状及经济价值。

工业废水中常含有酸、碱、有毒、有害物质、重金属或其他污染物等。而且在不同工业废水中所含的污染物的性质各不相同。对于这些特殊性质的废水，应在工厂内或车间内就地进行局部处理，这在技术上是容易办到的，在经济上也是比较合理的。对于与城市污水相近的工业废水，或经局部处理后不致对城市下水道及城市污水的生物处理过程产生危害的工业废水，单独设置污水处理设施是不必要的，也是不经济的，应该优先考虑排入城市下水道与城市污水共同处理，这样做既节约费用，又提高了处理效果。

城市污水虽不含有毒物质，但其中所含的悬浮物质会在水体中沉积、腐烂、发臭，影响水体的卫生性状，其中所含有机物质更会消耗水中的溶解氧，最终使水体变黑、发臭，并造成鱼类死亡、水源水质恶化。

废水处理应当达到的程度，要通过调查研究和计算才能确定，不考虑水体的自净能力，提出一些不切实际的过高要求，也是不合适的。当考虑将处理后的城市污水用于工业、农业和其他用途时，则应根据不同用途提出对污水处理的要求。

3. 加强对水体及其污染源的监测和管理

经常的监测和科学的管理可以使水体污染的防治工作有目标有方向地进行，因此是不可缺少的一环。这方面的工作应该包括：对工业废水的排放量和废水浓度的监测及管理；对污水处理厂的监测及管理；对水体卫生特征、经济指标的监测及管理等。应建立统一的管理机构，颁布有关法规，并按照经济规律办事。应分别制订出工业废水排入城市下水道的排放标准及城市污水、工业废水排入水体的排放标准。在国家标准范围内，对不同地区，应根据当地情况并使标准不断完善化。

（四）废水处理技术概述

废水处理的目的，就是用各种方法将废水中所含的污染物质分离出来，或将其转化

为无害物质，从而使废水得到净化。

1. 废水中的主要污染物质及其水质指标

废水的种类多种多样，其中所含的污染物质又千差万别，从防止污染和进行废水处理的角度上来看，有一些主要污染物及其水质指标如下：

1) pH 值：主要是指排出废水中的酸碱性。pH＜7，废水是酸性；pH＞7，废水是碱性。一般要求处理后废水的 pH 在 6~9 之间。

2) 悬浮物质：是指悬浮在水中的污染物质，其中包括无机物，如泥砂；也包括有机物，如油滴、食物残渣等。

3) 生物需氧量，简称 BOD_5。

4) 化学需氧量，简称 COD。

5) 有毒物质，是指酚、氰、汞、铬、砷等。当废水含有这些物质时，必须分别单独测定其含量，并考虑处理方法。

其他，如水温、油脂、溶解性物质、氮、磷含量……对于特殊的废水，也应成为主要考虑的水质指标。

2. 废水处理方法的分类

对不同的污染物质应采取不同的污水处理方法，这些处理方法可按其作用原理区分为三大类，即物理法、化学法、生物法(刘天齐等　1982)。

1) 物理法。主要是利用物理作用分离废水中呈悬浮状态的污染物质，在处理过程中不改变其化学性质。属于物理的处理方法有：

① 沉淀(重力分离)法。利用废水中的悬浮物和水的比重不同这一原理，借重力沉降(或上浮)作用，从水中分离出来。沉淀装置有沉砂池、沉淀池、隔油池等。废水在沉淀装置中的停留时间是：沉砂池约 2 分钟，沉淀池、隔油池 1.5~2 小时。

② 过滤法。是用过滤介质截留废水中的悬浮物。过滤介质有钢条、筛网、砂、布、 塑料、微孔管等。过滤设备有栅、筛微滤机、砂滤池、真空过滤机、压滤机(后两种多用于污泥脱水)等。处理效果与过滤介质孔隙度有关。

③ 离心分离法。废水中的悬浮物借助离心设备的旋转，在离心力作用下，悬浮物与水分离。离心力与悬浮物的质量成正比，与转速(或圆周线速度)的平方成正比。由于转速在一定范围内人工可以控制，所以能获得很好的分离效果，远超过重力分离法。离心设备有水力旋流器、旋流沉淀池、离心机等。一般离心法多用于处理轧钢废水氧化铁皮的去除，以及从洗羊毛废水中回收羊毛脂或污泥脱水等。

④ 浮选(气浮)法。此法是将空气打入废水中，使废水中乳状油粒(粒径在 0.5~2.5μm)粘附到空气泡上。油粒随气泡上升至水面，形成浮渣而去除。根据空气加入的方式不同，浮选设备有加压溶气浮选池、叶轮浮选池、射流浮选池等。废水在浮选池大约停留 0.5~1 小时。为了提高浮选效果，有时需向废水中投加混凝剂。这种方法的除油效率可达 80%~90 %。

⑤ 蒸发结晶法。将废水加热至沸腾、汽化，使溶质得到浓缩，再冷却结晶。如酸洗钢材的含酸废水处理就是经蒸发浓缩、冷却后分离出硫酸亚铁晶体及酸性母液。

⑥ 反渗透法。通过一种特殊的半渗透膜，在一定的压力下，将水分子压过去，而溶质则被膜所截留，废水得到浓缩，而压过膜的水就是处理过的水。膜材料有醋酸纤维素、磺化聚苯醚、聚砜酰胺等有机高分子物质。加入添加剂可做成板式膜、内管式、外管式膜，以及中空纤维膜等。操作压力一般是 30~50kg/cm^2，每天通过每平方米渗透膜的水量从几十升到几百升。目前已用于海水淡化，含重金属的废水处理，以及废水深度处理等方面。处理效率达 90%以上。反渗透法是膜分离技术的一种，膜分离技术包括反渗透、超过滤、电渗析及扩散渗析等。通常是把它们列为物理化学法。

2) 化学法。利用化学反应原理及方法来分离回收废水中的污染物，或改变污染物的性质，使其从有害变为无害。主要的处理方法有：

① 混凝法。水中的胶体物质，通常带有负电荷，胶状物间互相排斥不能凝聚，多形成稳定的混合液。若水中投加带有相反电荷的电解质(即混凝剂)后，可使废水中胶状物呈电中性，失去稳定性，并在分子引力作用下，凝聚成大颗粒而下沉。常用的混凝剂有硫酸铝、明矾、聚合氧化铝、硫酸亚铁、三氯化铁等。上述混凝剂可用于含油废水、染色废水、煤气站废水、洗毛废水等处理。

② 中和法。往酸性废水中投加碱性物质使废水达到中性。常用的碱性物质有石灰、石灰石、白云石等。对碱性废水可吹入含 CO_2 的烟道气进行中和，也可用酸中和。

③ 氧化还原法。废水中的溶解性有机物或无机物，在投加氧化剂或还原剂后，由于电子的迁移运动，而发生氧化或还原作用，使其转变为无害物质。常用的氧化剂有空气、漂白粉、氯气、臭氧等。氧化法多用于处理含酚、氰、硫等废水。常用的还原剂有铁屑、硫酸铁、二氧化硫等。还原法多用于处理含铬、含汞废水。

④ 电解法。在废水中插入通直流的电极。在阴极板上接受电子，使离子电荷中和，转变为中性原子。同时在水的电解过程中，在阳极上产生氧气，在阴极上产生氢气；上述综合过程使阳极上发生氧化作用，在阴极上发生还原作用。目前主要用于含铬废水处理等。

⑤ 汽提法。将废水加热至沸腾时吹入蒸汽，使废水中的挥发性溶质随蒸汽逸出，再用某种溶液洗涤蒸汽，回收其中挥发性溶质。再生后的蒸汽可循环使用。此法可用于含酚废水的处理，回收酚。

⑥ 萃取(液-液萃取)法。将不溶于水的溶剂投入废水中，使废水中的溶质溶于溶剂中，然后利用溶剂与水的比重差，将溶剂分离出来。再利用溶剂与溶质沸点差，将溶质蒸馏回收，再生后的溶剂可循环使用。例如含酚废水的回收，常用的萃取剂有醋酸丁酯、苯等，酚的回收率达 90%以上；常用的设备有脉冲筛板塔、离心萃取机等。

⑦ 吹脱法。往废水中吹进空气，使废水中的溶解性气体吹入大气中。此法可用于含二氧化碳、硫化氢、氢氰酸的废水处理。

⑧ 吸附法。将废水通过固体吸附剂，使废水中的溶解性有机或无机物吸附到吸附剂上，常用的吸附剂为活性炭。此法可吸附废水中的酚、汞、铬、氰等有毒物质。此法还有除色、脱臭等作用。一般多用于废水深度处理。离子交换也属于吸附法，只是在吸附过程中，吸附剂每吸附一个离子，同时也放出一个等当量的离子。

⑨ 电渗析法。通过一种离子交换膜，在直流电作用下，废水中的离子朝相反电荷

的极板方向迁移，阳离子能穿透阳离子交换膜，而被阴离子交换膜所阻，同样，阴离子能穿透阴膜，而被阳膜所阻。废水通过阴阳离子交换膜所组成的电渗析器时，废水中的阴阳离子就可得到分离，达到浓缩及处理目的。此法可用于酸性废水回收，含氰废水处理等。

3) 生物法。主要是利用微生物作用，使废水中呈溶解和胶体状态的有机污染物转化为无害的物质。属于生物处理的方法有以下几种：

① 活性污泥法。将空气连续鼓入曝气池的废水中，经过一段时间，水中能形成繁殖有大量好气性微生物的活性污泥，它能吸附和分解废水中的有机物，并以有机物为养料使微生物获得不断增殖。离开曝气池的废水与活性污泥的混合液，在沉淀池中沉淀，活性污泥分离后的水即为得到净化的水。沉下的活性污泥除排出一部分多余的(增殖的)之外，其余的循环回流到曝气池。污泥回流量约占废水的 25%~100%，维持曝气池的悬浮物量在 2~6g/L。活性污泥法有多种构造与运行方式，常用的有完全混合式表面曝气法、生物吸附法等。废水在曝气池中一般停留 3~6 小时，能去除废水的 $BOD_5$90%左右，是较为广泛采用的生物处理方法。

② 生物膜法。将废水连续通过固体填料(碎石、炉渣、圆盘或塑料蜂窝等)，在填料上繁殖大量微生物形成生物膜。生物膜能吸附及分解废水中的有机物。从填料上脱落下来老死的生物膜随废水流入沉淀池中沉淀，使沉淀池的出水得到净化。本法所用的装置有多种构造形式，例如有生物滤池、生物转盘、生物接触氧化池等。此法能去除废水中 BOD_5 达 80%~95%。

③ 生物(氧化)塘。废水在池塘中长时间停留(2~10 天)会被水中微生物逐渐分解而得到处理。池塘中的藻类及地面大气供氧维持微生物所需的氧。生物塘法可去除废水中的 $BOD_5$75%~90%。如废水无毒，在生物塘后段可养鱼。

④ 污水灌溉(土地处理系统)。污水在灌溉过程中，受到土壤的过滤、吸附及生物氧化作用而得到处理，同时污水中的氮、磷、钾则被植物吸收利用。据实验，污水在水田停留 3~8 天时，灌溉后出水的 BOD_5 的去除率可达 80%~90%。利用生活废水灌溉效果较好，但在利用工业废水时，则应慎重，水质必须符合灌溉标准，否则损毁作物，并且废水中有害物质会通过食物链毒害人畜。

3. 常用的废水处理流程

废水中的污染物质是多种多样的，不能预期只用一种方法就能够把所有的污染物质都去除干净。不论对何种废水，都往往需要通过几种方法组成的处理系统，才能达到处理的要求。

按照不同的处理程度，废水处理系统可分一级处理、二级处理和深度处理等不同阶段。

一级处理只去除废水中呈悬浮状态的污染物，物理法中的大部分方法是用于进行一级处理的。废水经一级处理后，一般仍达不到排放要求，尚需进行二级处理，因此对于二级处理来说，一级处理是预处理。

二级处理的主要任务是大幅度地去除废水中呈胶体和溶解状态的有机污染物。生物处理法(图 8-3)是最常用的二级处理方法，污水先经沉砂池除去较重砂粒杂质，然后进

入沉淀池，除去悬浮性污染物的污水，再经曝气池进行生物处理，使有机物进行分解，并经二次沉淀池沉淀分离活性污泥，去除污泥的水最后经消毒排放。比较经济有效。通过二级处理，一般废水均能达到排放标准。但在处理后的废水中，还残存有微生物不能降解的有机物和氮、磷等无机盐类，一般情况下，它们数量不多，对水体无大危害。

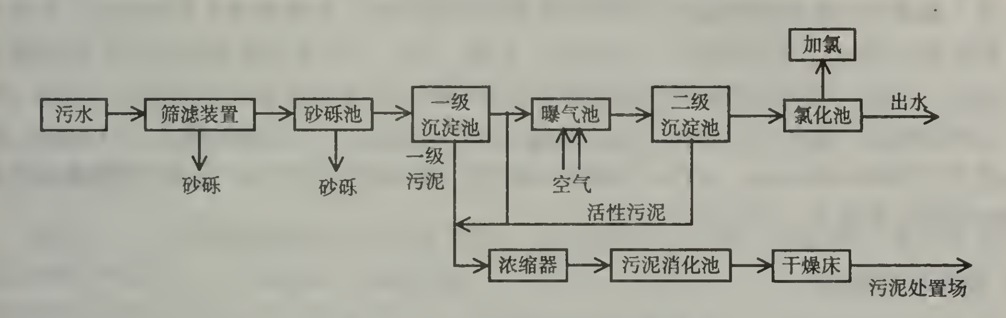


图 8-3 活性污泥二级处理流图

深度处理是进一步去除废水中的悬浮物质、无机盐类及其他污染物质，以便达到工业用水或城市用水所要求的水质标准。

（五）水体的富营养化及其生物防治

水体富营养化是指在人类活动的影响下，生物所需的氮、磷等营养物质大量进入湖泊、河口、海湾等缓流水体，引起藻类及其他浮游生物迅速繁殖，水体溶解氧量下降，水质恶化，鱼类及其他生物大量死亡的现象。在自然条件下，湖泊也会从贫营养状态过渡到富营养状态，不过这种自然过程非常缓慢。而人为排放含营养物质的工业废水和生活污水所引起的水体富营养化则可以在短时间内出现。水体出现富营养化现象时，浮游藻类大量繁殖，形成水华。因占优势的浮游藻类的颜色不同，水面往往呈现蓝色、红色、棕色、乳白色等。这种现象在海洋生态学中叫做赤潮或红潮。

1. 水体富营养化的机理

在地表淡水系统中，磷酸盐通常是植物生长的限制因素，而在海水系统中往往是氨氮和硝酸盐限制植物的生长以及总的生产量。导致富营养化的物质，往往是这些水系统中含量有限的营养物质，例如，正常的淡水系统中磷含量通常是有限的，因此增加磷酸盐会导致植物的过度生长，而在海水系统中磷是不缺的，而氮含量却是有限的，因而含氮污染物加入就会消除这一限制因素，从而出现植物的过度生长。生活污水和化肥、食品等工业废水以及农田排水都含有大量的氮、磷及其他无机盐类。天然水体接纳这些废水后，水中营养物质增多，促使自养型生物旺盛生长，特别是蓝藻和红藻的个体数量迅速增加，而其他藻类的种类则逐渐减少。水体中的藻类本来以硅藻和绿藻为主，蓝藻的大量出现是富营养化的征兆，随着富营养化的发展，随后变为以蓝藻为主。藻类繁殖迅速，生长周期短。藻类及其他浮游生物死亡后被需氧微生物分解，不断消耗水中的溶解氧，或被厌氧微生物分解，不断产生硫化氢等气体，从两个方面使水质恶化，造成鱼类

和其他水生生物大量死亡。藻类及其他浮游生物残体在腐烂过程中，又把大量的氮、磷等营养物质释放入水中，供新的一代藻类等生物利用。因此，富营养化了的水体，即使切断外界营养物质的来源，水体也很难自净和恢复到正常状态。

关于水体富营养化问题的成因有不同的见解。多数学者认为氮、磷等营养物质浓度升高，是藻类大量繁殖的原因，其中又以磷为关键因素。影响藻类生长的物理、化学和生物因素(如阳光、营养盐类、季节变化、水温、pH，以及生物本身的相互关系)是极为复杂的。因此，很难预测藻类生长的趋势，也难以定出表示富营养化的指标。目前一般采用的指标是：富营养化水体中氮含量超过 0.2~0.3μg/g，生化需氧量大于 10μg/g，磷含量大于 0.01~0.02μg/g，pH7~9 的淡水中细菌总数每毫升超过 10 万个，表征藻类数量的叶绿素 a 含量大于 10μg/L。

2. 营养物质的来源

水体中过量的氮、磷等营养物质主要来自未加处理或处理不完全的工业废水和生活污水、有机垃圾和家畜家禽粪便以及农施化肥，其中最大的来源是农田施用的大量化肥。

3. 水体富营养化的危害

富营养化会影响水体的水质，会造成水的透明度降低，使得阳光难以穿透水层，从而影响水中植物的光合作用，可能造成溶解氧的过饱和状态。溶解氧的过饱和以及水中溶解氧少，都对水生动物有害，造成鱼类大量死亡。同时，因为水体富营养化，水体表面生长着以蓝藻、绿藻为优势种的大量水藻，形成一层“绿色浮渣”，致使底层堆积的有机物质在厌氧条件下分解产生的有害气体和一些浮游生物产生的生物毒素也会伤害鱼类。因富营养化水中含有硝酸盐和亚硝酸盐，人畜长期饮用这些物质含量超标的水，也会中毒致病。

4. 富营养化的防治对策

富营养化的防治是水污染处理中最为复杂和困难的问题。这部分仅简要介绍富营养化水体中除磷和除氮的方法。

1) 控制外源性营养物质输入。绝大多数水体富营养化主要是外界输入的营养物质在水体中富集造成的。如果减少或者截断外部输入的营养物质，就使水体失去了营养物质富集的可能性。为此，首先应该着重减少或者截断外部营养物质的输入。控制外源性营养物质，应从控制人为污染源着手，应准确调查清楚排入水体营养物质的主要排放源，监测排入水体的废水和污水中的氮、磷浓度，计算出年排放的氮、磷总量，为实施控制外源性营养物质的措施提供可靠的科学根据。

2) 减少内源性营养物质负荷。输入到湖泊等的营养物质在时空分布上是非常复杂的。氮、磷元素在水体中可能被水生生物吸收利用；或者以溶解性盐类形式溶于水中；或者经过复杂的物理化学反应和生物作用而沉降，并在底泥中不断积累；或者从底泥中释放进入水中。减少内源性营养物质负荷，有效地控制湖泊内部磷富集，可采取不同的方法。主要的方法有：① 工程性措施。包括挖掘底泥沉积物、进行水体深层曝

气、注水冲释以及在底泥表面敷设塑料等。② 化学方法。这是一类包括凝聚沉降和用化学药剂杀藻的方法。③ 生物性措施。利用水生生物吸收利用氮、磷元素进行代谢活动以去除水体中氮、磷营养物质的方法。

三、大气污染及其防治

(一) 大气污染和大气污染物

1. 大气污染

随着工业及交通运输等事业的迅速发展，特别是煤和石油的大量使用，将产生的大量有害物质和烟尘、二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳、碳氢化合物等排放到大气中，当其浓度超过环境所能允许的极限并持续一定时间后，就会改变大气特别是空气的正常组成，破坏自然的物理、化学和生态平衡体系，从而危害人们的生活、工作和健康，损害自然资源及财产、器物等。这种情况即被称为大气污染或空气污染。

2. 大气污染物及其存在状态

(1) 大气污染物

大气污染物的种类不下数千种，已发现有危害作用而被人们注意到的有一百多种，其中大部分是有机物。依据大气污染物的形成过程，可将其分为一次污染物和二次污染物(奚旦立等 1987)。

一次污染物是直接从各种污染源排放到大气中的有害物质。常见的主要有二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳、碳氢化合物、颗粒性物质等。颗粒性物质中包含苯并(a)芘等强致癌物质、有毒重金属、多种有机和无机化合物等。

二次污染物是一次污染物在大气中相互作用或它们与大气中的正常组分发生反应所产生的新污染物。这些新污染物与一次污染物的化学、物理性质完全不同，多为气溶胶，具有颗粒小、毒性一般比一次污染物大等特点。常见的二次污染物有硫酸盐、硝酸盐、臭氧、醛类(乙醛和丙烯醛等)、过氧乙酰硝酸酯(PAN)等。

(2) 大气中的污染物质的存在状态

大气中的污染物质的存在状态是由其自身的理化性质及形成过程决定的；气象条件也起一定的作用。一般将它们分为分子状态污染物和粒子状态污染物两类。

1) 分子状态污染物　某些物质如二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳、氯化氢、氯气、臭氧等沸点都很低，在常温、常压下以气体分子形式分散于大气中。还有些物质如苯、苯酚等，虽然在常温、常压下是液体或固体，但因其挥发性强，故能以蒸气态进入大气中。

2) 粒子状态污染物。粒子状态污染物(或颗粒物)是分散在大气中的微小液体和固体颗粒，粒径多在 0.01~100μm 之间，是一个复杂的非均匀体系。通常根据颗粒物在重力作用下的沉降特性将其分为降尘和飘尘。粒径大于 10μm 的颗粒物能较快地沉降到地面上，称为降尘；粒径小于 10μm 的颗粒物可长期飘浮在大气中，称为飘尘。

通常所说的烟、雾、灰尘也是用来描述飘尘存在形式的。某些固体物质在高温下由于蒸发或升华作用变成气体逸散于大气中，遇冷后又凝聚成微小的固体颗粒悬浮于大气中构成烟。雾是由悬浮在大气中微小液滴构成的气溶胶。按其形成方式可分为分散型气溶胶和凝聚型气溶胶。通常所说的烟雾是烟和雾同时构成的固、液混合态气溶胶，如硫酸烟雾、光化学烟雾等。硫酸烟雾主要是由燃煤产生的高浓度二氧化硫和煤烟形成的，而二氧化硫经氧化剂、紫外光等因素的作用被氧化成三氧化硫，三氧化硫与水蒸气结合形成硫酸烟雾。当汽车尾气排放到大气中的氮氧化物、一氧化碳、碳氢化合物达到一定浓度后，在强烈阳光照射下，经发生一系列光化学反应，形成臭氧、PAN 和醛类等物质悬浮于大气中而构成光化学烟雾。尘是分散在大气中的固体微粒，如交通车辆行驶时所带起的扬尘，粉碎固体物料时所产生的粉尘。燃煤烟气中的含碳颗粒物等。

(二) 大气污染控制途径

1. 合理布局工业

工业布局是否合理与形成大气污染关系极为密切。工业过分集中的地区，大气污染物排放量必然很大，不易被稀释扩散；相反地，将工厂合理分散布设，将有利于污染物的稀释扩散。选择厂址时要充分考虑地形、气象等条件，以利于污染物的扩散。

2. 选择有利污染物扩散的排放方式

排放方式不同其扩散效果也不一样。目前国外较普遍采用的是高烟囱排放和集合式烟囱排放。一般地说，地面污染物浓度与烟囱高度的平方成反比。所以，提高烟囱的有效高度不仅能使烟气得到充分的稀释；同时，也是减轻地面污染的措施之一。但因烟囱高，当地的落地浓度虽然减少，而排烟范围则扩大了。所以采用上述措施尚不能根本解决污染问题。

集合式烟囱排放，就是将几个(一般是 2~4 个)排烟设备集中到一个烟囱中排放，以使排放的烟气温度增加，提高烟气出口速度。这种高温，高速的烟流将呈环状吹向天空，扩散效果良好，从而使矮烟囱起到高烟囱的作用

3. 区域集中供暖、供热

分散于千家万户的炉灶和市区密集的矮烟囱是大气烟尘的主要污染源。北方城市冬季取暖用煤量往往超过工业用煤量。采取区域集中供暖、供热，即在城市的郊外设立大的热电厂和供热站，以代替千家万户的炉灶，这是消除烟尘的有效措施。这样做有以下好处：① 可以提高锅炉设备的效率，降低燃料消耗量；② 可以利用废热，提高热利用率；③ 集中供热的大锅炉适于采用高效率的降尘器，从而大大减少粉尘的排放量；④ 可以减少燃料的运输量。

由于区域供暖既经济又合理，又能减少污染，所以发展很快，国外有些中、小城市，在市外两端设两个大热电厂就解决了全市用电用热的需要，而且市内没有一个烟囱，烟尘危害极微。

4. 改变燃料构成

对燃料进行选择和处理，是减少污染物产生的有效措施。各种燃料中灰分数量有很大差别，煤的灰分量为 5%~20%，石油为 0.2%，天然气灰分量更少。所以，应尽量选用灰分量少的燃料。

在有条件的城市，要逐步推广使用天然气、煤气和石油气，这不仅可以改进工业生产状况而且对于改变城市居民千家万户的炉灶污染也是很有必要的，我国燃料构成中以煤炭为主，应逐步扩大煤的气化设施和供应煤气的气体燃料。另外，应加强新能源的开发利用研究，如太阳能、氢燃料、地热能等，以代替煤炭燃料，减轻污染。

5. 绿化造林

绿化造林是防治大气污染的一个经济有效的方法，因为植物有吸收各种有害有毒气体和净化空气的功能，茂密的林丛能降低风速，使气流携带的大粒灰尘下降。树叶表面粗糙不平，多绒毛，有的植物还能分泌黏液和油脂，吸附大量飘尘。植物的光合作用放出氧气和吸收二氧化碳，因而能调节空气的成分，甚至有些植物能吸收大气中的有毒成分。所以城市环境应保持一定比例的绿地面积，以起到净化和缓冲大气污染的作用。

（三）大气污染的控制

为了控制环境的污染，保护和改善人类生活的环境质量，必须采取有效的对策，包括研究对污染源的治理技术，改革旧的工艺，以控制污染物的排放；制订合理的大气质量标准和大气污染物的排放标准；提出有关大气环境污染的综合防治措施等，对环境进行全面管理，以求做到合理发展经济和保护大气环境。

1. 烟尘治理技术

大气中固体颗粒污染物与燃料燃烧关系密切。减少固体颗粒物的排放方法可分两大类：一是改变燃料的构成，以减少颗粒物的生成，比如用天然气代替煤、用核能发电取代燃煤发电等；二是在固体颗粒物排放到大气之前，采用控制设备将尘除掉，以减少大气污染程度。这里重点介绍第二类方法。

烟气净化装置的种类很多，对一个特定的固定污染源来说，最合理的净化装置取决于下列因素：① 决定于体积流量以及颗粒的直径、浓度、腐蚀性和毒性等属于颗粒本身的特性；② 决定于所要求的收集效率、排放标准和经济成本。除尘装置按其作用原理大致可分为机械除尘器、湿式洗涤除尘器、袋式滤尘器和静电除尘器等四类。它们的性能不同，各有优缺点，要根据实际需要适当地加以选择或配合使用。各类除尘器的简单情况介绍如下：

第一，沉降室除尘。这是利用机械力(重力，离心力)将尘粒从气流中分离出来，达到净化的目的。其中最简单、廉价，操作维修简便的是沉降室，通过沉淀的烟道气降低了速度，一些较大的颗粒(直径大于 40μm)因重力而沉降下来，这种沉降室往往安装在其他收集设备之前，作为去除较大尘粒的预处理装置。

第二，旋风除尘器除尘。这是利用气体在分离器中旋转，烟尘颗粒在离心力的作用下被甩到外壁沉降到分离器的底部而被分离清除，清洁气体则上升，由顶部溢出(图 8-4)。这种分离方式使 5μm 以上的尘粒去除效率可达 50%~80%。5μm 以下的尘粒去除效率下降到 50%以下。

第三，湿式洗涤除尘器除尘。湿式洗涤除尘器是一种采用喷水法将尘粒从气体中洗出去的除尘器。这种除尘器种类很多，有喷雾塔式、填料塔式、离心洗涤器、喷射式洗涤器、文丘里式洗涤器等多种。其中最简单的一种是使含尘气体从塔的底部进去，而水从安装在塔顶上的许多喷头中淋洒下来(图 8-5)。这种除尘器的效果有一定局限性， 通常只能除去直径大于 10μm 的颗粒；如果采用离心式洗涤分离器，增加水滴和气流之间的相对速度，那么对 2~3μm 之间的尘粒去除效率可达 90%左右。这种方法的缺点是压力损耗大，需用大量水洗涤，存在有污水处理问题。

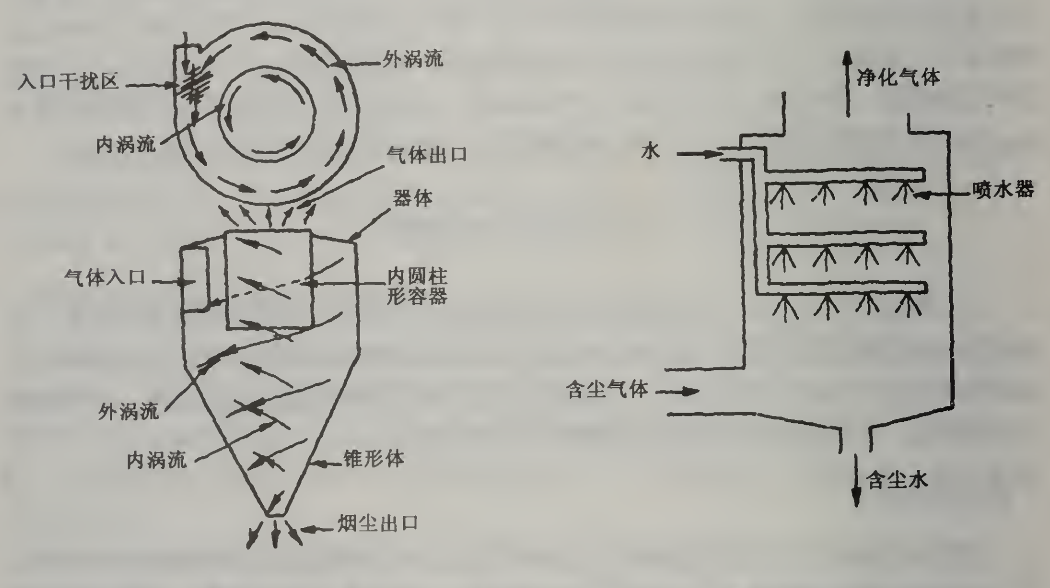


图 8-4　干式旋风除尘器示意图　　　　图 8-5　喷水塔示意图

第四，袋式滤尘器。用这种除尘器对直径 1μm 颗粒的去除率接近 100%。含尘气体通过悬挂在袋室上部的织物过滤袋而被除掉。一个袋室可装有若干只分布在若干个舱内的织物过滤袋。这种方法除尘效率高，操作简便，适合于含尘浓度低的气体，其缺点是占地多、维修费用高，不耐高温、高湿气流。

第五，静电除尘器的除尘。其原理是利用尘粒通过高压直流电晕吸收电荷的特性而将其从气流中除去。带电颗粒在电场的作用下，向接地集尘筒壁移动，借重力或者轻轻敲击而把尘粒从集尘电极上除掉。中心电极加有一个负高压，而外面的筒状集尘电极接地。这种静电除尘器的优点是对粒径很小的尘粒具有较高的去除效率，耐高温，气流阻力小， 除尘效率不受含尘浓度和烟气流量的影响，是当前发展的新型除尘设备。但设备投资费用高，占地大，技术要求高。

选择合适除尘设备的主要根据是要求达到的控制标准的高低。对于除掉大直径烟尘

颗粒，使用廉价的机械设备—沉降室或旋风式分离器就已足够。但要除掉较小颗粒的尘粒则需要采用除尘效率高的袋室除尘技术或静电除尘器。

2. 二氧化硫治理技术

目前消除和减少烟气中所含二氧化硫的量，主要有两种方法：即燃料脱硫和烟气脱硫。

(1) 燃料脱硫

目前消除燃煤中的硫分尚无很好的办法，只是重油脱硫取得一定进展。重油中的硫大部分为有机硫。要想使重油中硫分降低，必须破坏硫化物中的 C-S 键，使硫变成简单的、固体或气体的化合物，而从重油中分离出来，可采用加氢脱硫催化法。根据工艺过程的不同，又分为间接脱硫和直接脱硫。

1) 间接脱硫法。是将常压残油在加氢脱硫过程中，采用减压蒸馏，催化剂用氧化铝为载体，其上附有金属成分，这样生成的硫化氢和氨气相互结合为硫氢化铵。用这种方法可将含硫 4%的残油变为含硫 2.5%左右的脱硫油。

2) 直接脱硫法。这种方法是从改进催化剂入手，直接对残油加氢脱硫。此法效果好，可使脱硫油含硫量下降到 1%。

(2) 烟气脱硫

由于烟气量大，含硫低，烟温高，给脱硫技术带来不少困难，不少方法尚处于试验阶段。烟气脱硫方法一般可分为湿法和干法两大类。

1) 湿法。把烟气中二氧化硫和三氧化硫转化为液体和固体化合物，从而把它们从排出的烟气中分离出来，其中有石灰乳法、氨法等。石灰乳法以含 5%~10%的石灰石粉末或含硝石灰的乳硼作为吸收剂，吸收烟气中的二氧化硫，成为亚硫酸钙，具有一定的脱硫效率；氨法利用氨水溶液作为二氧化硫的吸收剂，吸收率可达 93%~97%，此法多用于处理硫酸厂的制酸尾气或电厂锅炉的烟道气。

2) 干法。由于湿法脱硫后烟气温度降低，湿度加大，排出后影响烟气的上升高度， 往往笼罩在烟囱周围地区难以扩散。为克服上述缺陷，采用固体粉末或非水的液体作为吸收剂或催化剂进行烟气脱硫，称为干法脱硫。这种脱硫法又可分为吸附法和化学吸收法等。吸附法一般采用活性碳作吸附剂，使烟气中的二氧化硫在活性碳表面上与氧及水蒸气发生反应生成硫酸而被吸附，这种方法的脱硫率可达 90%；化学吸收法系利用金属氧化物对二氧化硫的吸收能力来脱硫，如用碱金属氧化物作为吸收剂者称为铝酸钠法，用氧化锰作吸收剂者称为氧化锰法。

3. 光化学烟雾的治理

光化学烟雾主要是由于交通运输工具等移动性污染源排放的废气在大气中形成的二次污染物，要做到控制“烟雾”的形成，必须从改革城市交通运输工具和治理工业企业氮氧化物的排放入手。

(1) 改革城市交通运输工具

城市交通运输工具汽车、火车、飞机等移动性污染源都不同程度地产生废气，其中

汽车排气污染最重，排出的废气成分有一氧化碳、碳氢化合物、氮氧化物等，是产生光化学烟雾的主要来源。

汽车排气主要来自发动机汽油的燃烧，改革汽车燃料和设备是当前减少汽车排气的有效措施。首先要改变汽车目前所使用的燃料而采用新燃料，例如，使用液化石油气(主要是丙烷和丁烷)、液化天然气、甲醇等作为汽车燃料等。但这些燃料的处理、运输和可用性都较困难，因这些燃料大都需要特殊的耐高压贮存装置和运载装置，还需要对目前使用的燃料进行加工，减少其挥发性和化学活性，取消在燃料汽油中加铅的作法。其次，还需对汽车设备的结构进行改革，主要是改革内燃机的结构，发展转子发动机取代往复式发动机等。另外，在汽车上安装排气净化装置如热反应器和催化转化器等，也都是减少漏气和废气、从而减少污染的措施。

从发展远景看，研究发展高效率的城市交通运输工具，采用新型能源如氢能、太阳能等无污染的机动车辆，也是解决大气污染的重要方向。

(2) 氮氧化物的处理

这里指的是在工业企业排放的废气中去除氧化氮的方法，主要有吸收法、非选择性催化还原法和选择性催化还原法等。

1) 吸收法。这种方法根据所使用的吸收剂，又可分为碱吸收法、熔融盐吸收法和硫酸吸收法等。

2) 非选择性催化还原法。它是应用铂作为催化剂，以氢和甲烷等还原性气体作还原剂，将废气中的氮氧化物还原成氮。

3) 选择性催化还原法。此法是以贵重金属铂等的氧化剂为催化剂，以氨、硫化氢和一氧化碳为还原剂，选择最佳脱硝反应温度，这个温度应随所选用的催化剂、还原剂的不同而不同。此法是干法脱硝中最有希望的方法。

4. 绿色植物对大气污染物的净化作用

绿色植物是生态平衡的支柱。绿色植物不仅能美化城市、吸收二氧化碳制造氧气， 而且具有吸收有害气体、吸附尘粒、杀菌、改善小气候、避震、防噪音和监测空气污染等许多方面的长期和综合效果。

1) 绿色植物对有害气体的吸收作用。绿色植物吸收有害气体主要是靠叶面举行的。据试验，一万平方米的高大森林，其叶面积可达 75 万 m^2，1 万平方米的草坪，其叶面积为 22~28 万 m^2。庞大的叶面积在净化大气方面起到了重要的作用。但当大气中的有害气体超过了绿色植物能承受的浓度，植物本身也会受害，甚至枯死。只有那些对有害气体抗性强、吸收量大的绿色植物才能在大气污染较严重的地区顽强地生长，并发挥其净化作用。绿色植物对有害气体的吸收作用包括绿色植物对二氧化硫的吸收、对氟化氢的吸收、对氯气的吸收、对其他有害气体的吸收等等。

2) 绿色植物的减尘作用。绿色植物都有滞尘的作用，其滞尘量的大小与树种、林带、草皮面积、种植情况以及气象条件等均有密切的关系。

3) 绿色植物的杀菌作用。大气中散布着各种细菌，通常尘粒上附有不少细菌，通过绿色植物的减尘作用，也就减少了空气中的细菌。同时，绿色植物本身也具有杀菌作

用。

4) 绿色植物吸收二氧化碳放出氧气的作用。绿色植物是吸收二氧化碳，制造氧气的天然加工厂。

5) 森林对大气污染防治的作用。森林固定太阳能，吸收二氧化碳，放出氧气，还能把大量的土壤液态水变为汽态水，散发到大气中去。森林的这些作用都对大气的组成起着调节作用。因此说，森林是自然环境的调节器，对防治大气污染起着至关重要的作用。

四、土壤的污染及其防治

(一) 土壤污染及污染物质的来源和种类

1. 土壤污染的概念

土壤污染是指人类活动所产生的物质(污染物)，通过多种途径进入土壤生态系统，其数量和速度超过了土壤容纳的能力和土壤净化速度的现象。土壤污染可使土壤的性质、组成及性状等发生变化，使污染物质的积累过程逐渐占据优势，破坏了土壤的自然动态平衡，从而导致土壤正常功能失调，土壤质量恶化，影响作物的生长发育，造成产量和质量的下降，并可通过食物链引起对生物和人类的危害，甚至形成对生命系统的超地方性的危害(刘培桐等 1985)。

2. 土壤中污染物质的来源和种类

1) 土壤污染物质的来源。土壤污染的发生特征是与土壤所处的地位和功能相联系的，其污染物主要来自两个方面：① 人为污染源。土壤污染物主要来自工业和城市的废水和固体废物、农药和化肥、牲畜排泄物、生物残体及大气沉降物等。② 自然污染源。在自然界中某些矿床或物质的富集中心周围，经常形成自然扩散晕，而使其附近土壤中某些物质的含量超出土壤正常含量范围，而造成的土壤污染。

2) 土壤污染物的种类。土壤的污染源是十分复杂的，所以土壤污染物的种类也极为繁多，有化学污染、物理污染、生物污染和放射污染等，其中以土壤的化学污染最为普遍、严重和复杂。化学污染物质可分为无机污染物和有机污染物两大类：① 无机污染物。土壤中的无机污染物包括对生物有危害作用的元素和化合物，主要是重金属、放射性物质，营养物质和其他无机物质等(Hiroki 1992)。重金属有汞、镉、铅、砷、铜，锌，钴，镍、硒等；放射性物质主要指铯、锶、铀等；营养物质主要指氮、磷、硫、硼等；其他物质主要指氟、酸、碱，盐等。② 有机污染物。土壤中的有机污染物主要是化学农药，目前在世界范围内大量使用的农药约 50 余种，有有机氯类、有机磷类、氨基甲酸酯类，苯氧羧酸类、苯酰胺类等。石油、多环芳烃、多氯联苯、甲烷等也是土壤中常见的有机污染物。

此外，还有生物类，例如肠细菌、炭疽杆菌、蠕虫类等侵入土壤，它们的大量繁衍，对人体健康或生态系统均产生不良影响。

(二) 土壤污染的主要发生途径

污染物质可以通过多种途径进入土壤，其主要发生类型可归纳为四种。

1. 大气污染型

污染物质来源于被污染的大气，污染物质主要集中在土壤表层，其主要污染物是大气中的二氧化硫，氮氧化物和颗粒物等，它们通过沉降和降水而降落地表。如由于大气中的二氧化硫等酸性氧化物使雨水酸度增加，可引起土壤酸化，破坏土壤肥力与生态系统的平衡；各种大气飘尘(包括重金属、非金属有毒有害物质及放射性散落物等)降落地面，会造成土壤的多种污染。

2. 水污染型

城乡工矿企业废水和生活污水，未经处理不实行清污分流，就直接排放，会使水系和农田遭到污染。特别是在水源不足的地区，引用污水灌溉，常使土壤受到重金属、无机盐、有机物和病原体的污染，并影响到作物、蔬菜的质量。

3. 固体废弃物污染型

主要是工厂矿山的尾矿废渣、污泥和城市垃圾等作为肥料施用或在堆放过程中通过扩散、降水淋洗等直接或间接地影响土壤。

4. 农业污染型

污染物主要来自施入土壤的化学农药和化肥，其污染程度与化肥、农药的数量、种类、利用方式及耕作制度等有关。有些农药如有机氯杀虫剂、六六六等，在土壤中长期残留，并在生物体内富集；氮、磷等化学肥料，凡未被植物吸收利用和未被根层土壤吸附固定的养分都在根层以下积累或转入地下水，成为潜在的环境污染物。残留在土壤中的农药和氮、磷等化合物在地面径流或土壤风蚀时，就会向其他地方转移、扩大土壤的污染范围。

上述土壤污染类型是相互联系的，它们在一定的条件下可以相互转化。固体废弃物污染型可以转化为水污染型和大气污染型，农业污染型本身就是固体废弃物污染型、大气污染型及水污染型。

(三) 农药和化肥污染土壤的机理

1. 土壤对化学农药的吸附作用

进入土壤的化学农药通过物理吸附、化学吸附、氢键结合和配价键结合等形式吸附在土壤颗粒表面。农药被土壤吸附以后，移动性和生理毒性随之发生变化。所以土壤对农药的吸附作用，在某种意义上就是土壤对有毒物质的净化和解毒作用。但这种净化作用是不稳定的，也是有限度的，当吸附的农药被土壤溶液中的其他物质重新置换出来

时，即又恢复了原来的性质。

土壤对农药吸附力的强弱既决定于土壤特性，也决定于农药性质。残留于土壤中的农药，在土壤溶液中一般均解离为有机阳离子的形式，被土壤中带负电的胶体吸附。土壤有机质和各种粘土矿物对农药的吸附能力按下列顺序递减：有机体>蛭石>蒙脱石>伊利石>绿泥石>高岭石。土壤有机质的吸附容量很大，对农药的吸附力量强，残留在土壤中的林丹、西玛津和 2，4，5-T 等大部分都吸附在土壤有机质部分。土壤对有机磷农药中马拉硫磷的吸附力也很强。土壤中各种粘土矿物由于其比表面不同，对农药的吸附能力亦有很大的差异。

化学农药本身的性质对土壤的吸附作用影响也很大。在各种农药的分子结构中，凡带有 R_3N^+—、—$CONH_2$、—OH、—NH_2COR、—NH_2、—OCOR、—NHR 功能团的农药都能增强被吸附的强度，尤其是带—NH_2 的化合物，被吸附力更强。维伯尔(Weber)等对不同结构的均三氮苯类进行了研究指出，在苯环第二位上带不同功能团的农药被钠饱和的蒙脱石吸附时，其吸附能力顺序是—SO_2H_5>—SCH_3>—OCH_3>—OH>—CL。

另外，土壤胶体对有机农药的吸附作用是有选择性的，如高岭石对除草剂 2，4-D 的吸附能力，要比蒙脱石和蛭石大；杀草快和百草枯可为粘土矿物所强烈吸附，而有机胶体对它的吸附能力却较弱。

土壤的 pH 也影响土壤对农药的吸附作用，如 2,4-D 在 pH3~4 的条件下解离成有机阳离子，被土壤中带负电的胶体吸附；在 pH6~7 的条件下，它解离成有机阴离子，被土壤中带正电的胶体吸附，在同类型的农药品种中，农药分子量越大，被吸附的能力越强。农药的溶解度对吸附也有影响，溶解度小者易被吸附。

土壤胶体除通过交换作用对农药吸附外，还可借氢键将农药与胶体联系在一起，土壤对农药吸附力的大小，关系到农药在土壤中的有效性和土壤对农药的净化效果。土壤对农药的吸附力越强，农药在土壤中的有效度越低，而土壤对农药的净化效果则越好。但是，这类土壤净化作用是相对不稳定的，也是有限度的，当被吸附的化学农药为其他阳离子交换回到溶液时，仍可恢复其原有性质，当加入化学农药的量超过土壤的吸附能力时，土壤就失去了对农药的净化能力，从而使土壤遭受农药的污染。因此，土壤对化学农药的吸附作用，只是在一定条件下起净化和缓冲解毒作用，而没有使化学农药得到降解。

2. 化学农药在土壤中的挥发、扩散

土壤中的农药，在被土壤固相物质吸附的同时，还通过气体挥发和水的淋溶在土体中扩散迁移，为生物体吸收或移出土体之外，因而导致大气、水体和生物的污染。

农药随水的迁移形式有两种。一些在水中溶解度大的农药直接随水迁移；一些难溶性农药主要附着于土壤颗粒表面进行水的机械迁移，最终流入江河水体。农药在土壤中的水迁移与农药本身的溶解度及土壤的吸附性能有关。在吸附容量小的砂土中农药易于迁移，在黏质土壤和含有机质多的土壤中不易迁移。HeLLing 曾直接用土壤作薄层板的吸附剂，用水作展开剂，以此求出各种农药的移动性能。一般农药在土壤中移动较慢，其中如三氯醋酸、茅草枯等在土壤中的水迁移最快，其次是取代脲类和二氮杂苯类(如西玛津、敌草隆)，最慢的是氯化烃类，如滴滴涕、六六六等，在一般情况下不易在土

体内随水向下淋移，所以农药在土壤中多存在于表面 30cm 的土层内，往深处就很少，这样农药对地污染一般是不大的，主要是由于土壤流失，通过地表径流流入天然水体，造成水体农药污染。因此，农药在土壤中的挥发、迁移，虽可促使土壤环境的净化，但却导致其他环境系统的污染。

3. 农药在土壤中的降解

通常认为农药在土壤中主要发生三种降解作用：光化学降解、化学降解、微生物降解。

1) 光化学降解。是指土壤表面受太阳辐射能和紫外线等作用而引起的光分解现象。在实际中由于光能可被土壤强烈地吸收，以致射到土面上的光在很大程度上对光化学降解是无效的，而同时在实验中很难排除农药在土内通过其他途径而分解的可能性。可以认为，通常情况下土壤中的农药光分解作用的发生总是很微弱的。

2) 化学降解。是土壤中普遍存在的现象，许多农药的化学降解可经几条途径进行，但所发生的反应都以水为媒介，水作为反应介质和反应物，或二者兼有之。这些作用中以水解作用与氧化作用为常见。另外这些反应中还有一种作用叫做亲核取代作用，它是通过不溶于水的反应物或通过土壤有机质不溶部分的反应基因进行的取代作用，这种作用与水解作用是不同的。此外，农药还具有各种类型的自由取代基在土壤中进行反应的独特能力。即通过农药和土壤溶液中所含的金属氧化物、金属离子、粘粒表面、有机体表面和从土壤中分离出来的有机质进行的取代作用，这类作用可称为非生物降解作用。

3) 生物降解。在土壤中存在的农药存在着一种生物降解作用，即在微生物的分解作用下进行的。大部分农药进入土壤中，首先对土壤微生物(包括一些有益微生物)产生抑制作用，但随着时间的延长微生物有一个相对的适应阶段。当微生物大量繁殖后，农药即被微生物降解，直到农药被微生物耗尽为止。这一作用也受到环境条件因素的影响，如温度、pH、水分条件、通气状况和养分的补给等。这方面研究最早的是对除草剂 2,4-D 等从土壤中消失的动力学过程，论证了这些过程的生物学性质；当 2,4-D 稀溶液不断通过团粒土柱循环渗滤时，2,4-D 浓度下降过程呈现三个阶段：① 2,4-D 浓度稍有下降，表明有少量 2,4-D 被吸附在土柱上。② 2,4-D 浓度基本无变化，即所谓“迟缓期”。在这期间微生物或是由于突变或是由于对农药逐渐适应而生长发育，这阶段持续时间较长。③ 适应 2,4-D 的微生物大量繁殖起来，即所谓“富集期”，2,4-D 的浓度就呈对数下降，直到农药被微生物耗尽为止。当接着加第二份 2,4-D 时，它就以同样的速度在二到三天内被微生物迅速分解而不再出现“迟缓期”。

总之，农药是人工合成的有机化合物。它与天然有机化合物相比，稳定性较强，不易被化学作用和生物化学作用所分解，能在环境中较长期地存在。但不管其稳定性有多强，作为有机化合物的农药终究要在各种化学作用与生物化学作用下逐渐分解，最后转化为无机化合物，这一过程称为化学农药的降解过程。降解速度快的农药，在环境中残留时间短，称为低残留农药；降解速度慢的农药，在环境中残留时间长，称为高残留农药。

（四）土壤污染的防治

对于土壤污染，必须贯彻“预防为主，防治结合”的环境保护方针。首先要控制和消除污染源。同时，应该看到土壤具有强大的净化能力，在防治土壤污染时应充分利用这一特点。对已经污染的土壤要采取一切有效措施，消除土壤中的污染物，控制土壤中污染物的迁移转化，使其最终不能进入食物链。

1. 控制和消除土壤污染源

控制和消除土壤污染源，是防止污染的根本措施。土壤对污染物所具有的净化能力相当于一定的处理能力。控制土壤污染源，即控制进入土壤中的污染物的数量和速度，通过其自然净化，而不致引起土壤污染。

1) 控制和消除工业“三废”排放。大力推广闭路循环、无毒工艺，以减少或消除污染物质。对工业“三废”进行回收处理，化害为利。当前必须排放的“三废”，要进行净化处理，并控制污染物排放的数量和浓度，使之符合排放标准。

2) 加强土壤污灌区的监测和管理。污灌区要加强监测，经常了解污染物质的成分、含量及其动态，控制污水灌溉数量，避免盲目滥用污水灌溉而引起的土壤污染。

3) 控制化学农药的使用。禁用或限用剧毒、高残留性农药，大力研制高效、低毒、低残留农药，并发展生物农药。根据所使用农药的特性，合理施用农药，制订施用农药的安全间隔期。为防止农药进入人体，应制定农药在农畜产品中的容许残留量(最大允许含量)。采用综合防治措施，既能防治病虫害，又能做到把农药对环境和人体健康的影响限制在最低程度。

4) 合理施用化学肥料。为保证农业的增产，合理施用化学肥料是必需的。但施用过量，会引起作物的减产和质量降低，还会造成作物中硝酸盐含量过高，而影响人和家畜的健康，也会使重金属元素含量增加，造成土壤污染。

2. 增加土壤容量和提高土壤净化能力

增加土壤有机质含量、砂掺黏和改良砂性土壤，可以增加和改善土壤胶体的种类和数量。

3. 其他防治土壤污染的措施

1) 施加抑制剂。对重金属轻度污染的土壤，施加抑制剂，可改变重金属污染物质在土壤中的迁移转化方向，降低重金属向植物体内的转移。常用的抑制剂有石灰、磷酸盐、硅酸钙等。 施用石灰、提高土壤 pH，可促使镉、铜、锌、汞等形成氢氧化物沉淀。汞在施用石灰后 pH 大于 6.5 时，就能形成氢氧化物和碳酸盐沉淀，铜在土壤 pH 为 5~7 时，溶解度最小；若沉淀氢氧化镉要求较高的 pH(10 以上)；钙离子能阻止汞离子争夺植物根表面的交换位置。所以施用石灰可以减少作物对这些重金属的吸收。据试验，施用石灰后，可使稻米含镉量降低 30%。

2) 控制土壤氧化-还原条件。控制氧化-还原条件，也是减轻重金属污染危害的重要措施。据研究，在水稻抽穗到成熟期，无机成分大量向穗部转移，淹水可明显地抑制水

稻对镉的吸收，落干则能促进镉的吸收，提高糙米中镉的含量。除镉外，铜、铅、锌等元素均能与土壤中的 H_2S 反应，产生硫化物沉淀。因此，加强水浆管理，可有效地减少重金属的危害。但砷与其他重金属相反，随着 Eh 的降低，毒性增加。因此在砷和其他重金属混合污染的农田，改良措施可能发生矛盾。只改变土壤 Eh 条件，将是无效的，向土壤中增施磷酸盐类物质可能是有作用的。

3) 改变耕作制度。改变耕作制度、改变土壤环境条件，可消除某些污染物的毒害。旱田改水田，DDT 和六六六在旱田中降解速度慢，积累明显，残留量大；在水田中的 DDT 降解加快，利用这一性质实行水旱轮作，是减轻或消除农药污染的有效措施。

4) 客土深翻。被重金属或难分解的化学农药严重污染的土壤，在面积不大的情况下，可采用客土换土法，是消除土壤污染的有效办法，但对换出的污染土壤必须妥善处理，防止次生污染。这种办法对局部受放射性污染的土壤是可行的。此外，也可将表层污染土壤深翻到下层，以不影响作物根系发育为限，不致污染作物。但要注意防止对地下水的污染。

总之，在防治土壤污染的措施上，必须考虑到因地制宜，采取可行的办法，既消除土壤环境的污染，也不致引起其他环境污染问题。

五、固体废物的处理与资源化

(一) 固体废物的定义、种类及来源

固体废物，一般是指人类在生产、流通、消费以及生活等过程提取目的组分后，废弃去的固态或泥浆状物质。实际上所谓废弃物一般是指在某个系统内不可能再利用的部分物质，例如植物的枯枝败叶、动物的骨骼排泄物、人类生活中的各种垃圾、工业生产过程的排出物等。但这些废弃物中有些属有机物，经过适当处理可作优质肥料供植物生长，工业废料经过挑选加工可成为有用之物或可重新用作原料，也就是说固体废物可以重新资源化(何强等 1994)。

1. 固体废物的产生

固体废物大部分来自人类生产活动的许多环节，其中也包括来自各种废物处理设施的排弃物，其余部分则来自人类的生活活动，主要为生活垃圾，粪便等。在当今的技术条件下，随着经济的不断发展，工业生产规模不断扩大，其废弃物排放量也与日俱增。我国固体废物的产生量，随着经济的发展和人民生活水平的不断提高在急剧增加。

2. 固体废物的分类

固体废物有多种分类法，按其化学性质可分为有机废物和无机废物，按其危害状况可分为有害废物和一般废物，按其形状一般可分为固体的(颗粒状、粉状、块状)和泥状

的(污泥)。通常为便于管理，可按来源进行分类，可分为矿业固体废物、工业固体废物、城市垃圾、农业废弃物和放射性废物五类。矿业废物来自矿物开采和矿物筛选过程，工业废物来自冶金、煤炭、电力、化工、交通、食品、轻工、石油等工业的生产和加工过程，城市垃圾主要来自市镇居民的消费、市政建设和维护、商业活动，农业废弃物主要来自农业生产和禽畜饲养，放射性废物主要来自核工业和核电的生产、核燃料循环、放射性医疗和核能应用及有关的科学研究等。

（二）固体废物的危害

固体废物对人类环境的危害，表现在以下几个方面。

1）侵占土地。固体废弃物不加利用就需占地堆放，堆积量越大，占地越多，据估算，每堆积 1 万 t 渣，约需占地 1 亩。越来越多的城市垃圾还在继续增长。这些城市垃圾、矿业尾矿、工业废渣等侵占了越来越多的土地，从而直接影响了农业生产、妨碍了城市环境卫生，而且埋掉了大批绿色植物，大面积地破坏了地球表面的植被，这不仅破坏了自然环境的优美景观，更重要的是破坏了大自然的生态平衡。

2）污染土壤。废物堆置，其中的有害组分容易污染土壤。如果直接利用来自医院、肉类联合厂、生物制品厂的废渣作为肥料施入农田，其中的病菌、寄生虫等，就会使土壤污染。土壤是许多细菌、真菌等微生物聚居的场所，这些微生物形成了一个生物群落，在大自然的物质循环中担负着碳循环和氮循环的部分重要任务。工业固体废物，特别是有害固体废物，经过风化、雨淋，产生高温、毒水或其他反应，能杀伤土壤中的微生物和动物，降低土壤微生物的活动，并能改变土壤的成分和结构，使土壤被污染。

3）污染水体。固体废物随天然降水径流进入河流、湖泊，或因较小颗粒随风飘迁、落入河流、湖泊，造成地面水被污染，固体废物随渗沥水渗到土壤中，进入地下水，使地下水受污染，废渣直接排入河流、湖泊或海洋，会造成上述水体的污染。

4）污染大气。固体废物一般通过下列途径可使大气受到污染。在适宜的温度和湿度下，某些有机物被微生物分解，释放出有害气体；细粒、粉末受到风吹日晒可以加重大气的粉尘污染，如粉煤灰堆遇到四级以上风力，可被剥离 1~1.5cm，灰尘飞扬可高达 20~50m，有些煤矸石堆积过多会发生自燃，产生大量的二氧化硫，采用焚烧法处理固体废物也会使大气受到污染。

（三）固体废物处理及资源化技术

1. 资源化的含义

资源化即废物的再循环利用，回收能源和资源。随着工业发展速度的增长和生活水平的提高，固体废物的数量以惊人的速度不断上升。在这种情况下，如果能大规模地建立资源回收系统，必将减少原材料的采用，减少废物的排放量、运输量和处理量。这样，不仅可以提高社会环境效益，而且做到物尽其用，取得一定的经济效益。所以固体

废物资源化的技术开发是一项十分有意义的工作。

我国固体废物的综合利用，亦取得了不少进展。工业固体废物的综合利用率从1985年以来稳步上升，目前近 30%左右，但仍然低于国际先进水平，因而有待于进一步开发高效的资源化技术。

2. 资源化系统

资源化系统是指从原材料制成的成品，经过市场消费，最后成为废物又引入新的生产-消费循环系统。就整个社会而言，就是生产-消费-废物的一个不断循环系统(图 8-6)。

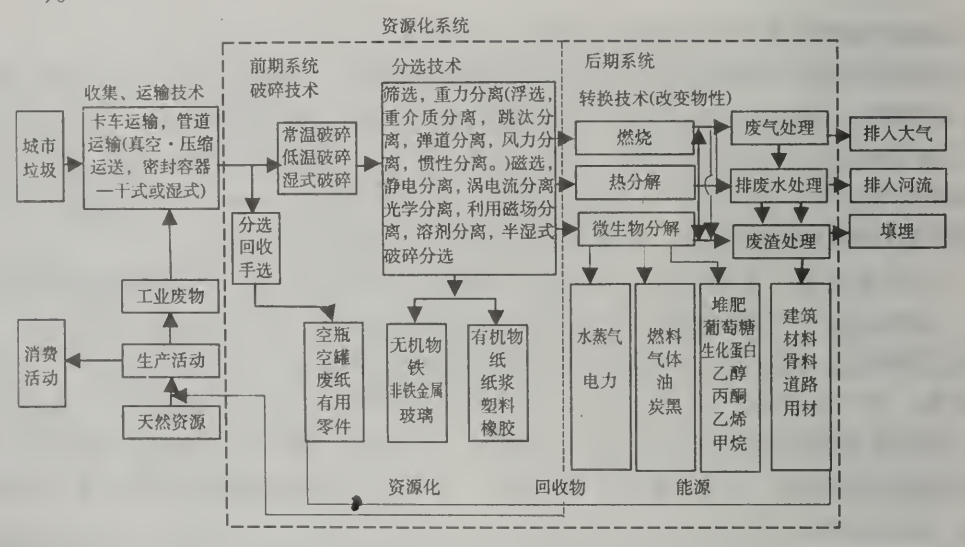


图 8-6 资源化系统

值得注意的是，由于工业固体废物不同于城市生活固体废物，其成分性质复杂，随不同的生产行业而具有显著的差异。实际上，对工业固体废物的回收，必须根据具体的行业生产特点而定。在进行资源回收系统的开发、规划和评价时，还应注意以下问题：① 资源化技术应是可行的；② 固体废物资源化的经济效益应该是较大的；③ 废物应尽可能在排放源地就近利用，以便节省废物收贮、运输等过程的投资，从而提高资源化的经济效益；④ 固体废物资源化的产品，应具有与相应的原材料所制得的产品相竞争的能力，才能使技术持久。

总之，理想的资源化系统要综合地进行技术、经济和社会的论证，才能实现。

3. 固体废物的一般处理技术

1) 预处理技术。固体废物预处理是指采用物理、化学或生物方法将固体废物转变成便于运输、贮存、回收利用和处置的形态。预处理常涉及固体废物中某些组分的分离与浓集，因此往往又是一种回收材料的过程。预处理技术主要有压实、破碎、分选和固化等。

2) 焚烧热回收技术。焚烧是高温分解和深度氧化的过程，目的在于使可燃的固体

废物氧化分解，借以减容、去毒并回收能量及副产品。几乎所有的有机废物都可以用焚烧法处理，其优点在于能迅速而大量地减少废物容积、消除有害微生物，破坏毒性有机物并回收热能。但是，焚烧容易造成二次污染，而且投资和运行管理费用也较高。焚烧法在发达国家中发展比较迅速，成为除土地填埋之外一个重要的处理手段，但在我国，城市垃圾的有机物含量一般偏低，大规模应用此法目前还不经济。

3) 热解技术。热解是在无氧或有氧条件下的可燃物高温分解，并以气体油或固形炭的形式将热量储存起来的过程。这是回收能源的一个有效途径，优点在于能回收可贮存和可运输的燃料。

4) 微生物分解技术。利用微生物的分解作用处理固体废物的技术，应用最为广泛的是堆肥化。堆肥化是指依靠自然界广泛分布的细菌、放线菌和真菌等微生物，人为地促进可生物降解的有机物向稳定的腐殖质生化转化的微生物学过程。其产物称为堆肥。其主要作用是能够改善土壤的物理、化学和生物性质，使土壤环境保持适于农作物生长的良好状态，而且又有增进土壤肥效的作用。从发展趋势来看，土地填埋的场所一般难以保证，焚烧处理的成本太高，而且二次污染严重，因此，堆肥化得到了广泛的重视。我国的具体情况是垃圾量大，农业又要求提供大量有机肥料作为土壤改良剂，因此，堆肥化是一条可行的垃圾处理途径。

4. 固体废物的无害化处置

1) 固体废物处置的目的。固体废物是多种污染物质的终态，将长期保留在环境中， 为了控制其对环境的污染，必须进行最终处置，使它最大限度地与生物圈隔离，因此其是为解决最终归宿问题而寻求的合理途径，也是对固体废物管理的最后一个环节。

2) 废物残渣最终处置方法的选择。对于少量的高危险性废物，如高放射性废物等，国际上已经进行了大量的实验研究和可行性探讨，并积累了大量的经验，例如将废物固化后进行孤岛处置，极地处置或深地层处置等。但对于量大面广的固体废物，这些做法都是不现实的，因此必须寻求其他可行的方法。如果不考虑排入外层空间和大气中的可能性，废物处置有两种基本途径：一是排入海洋或其他大的水域，二是在地面上进行处置。除极个别的情况外，废物已不再被允许倾入海洋，这是因为海洋处置容易造成污染，破坏海洋的生态环境。因此，陆地处置事实上已成为我们惟一的选择。

3) 固体废物的土地填埋。土地填埋是使用最为广泛的土地处置技术，其实质是将固体废物铺成有一定厚度的薄层后加以压实，并覆盖土壤的方法。它是从传统的堆放和填地处置发展起来的，这些传统技术容易污染水源和大气，因此很不可取。尤其是 20 世纪 70 年代末美国腊芙运河公害事件的产生更促使人们研究新的安全处置方法。今天的土地填埋已不是单纯的堆、填和埋，而是按工程理论和土工标准，对固体废物进行有效控制管理的科学工程方法，并在大多数国家广泛应用。按照处置对象及技术要求上的差异，土地填埋主要分为卫生填埋和安全填埋两类。 前者适用于生活垃圾的处置，后者则用于处置工业固体废物，特别是有害废物。今天，卫生填埋的涵义已不同于以往的堆、填的概念，而与传统方法有本质上的差别。它由于安全可靠和价格低廉，目前已为世界上许多国家所采用。安全填埋是处置有害废物的一种较好的方法，实际上是卫生填

埋的进一步改进，对场地的建造技术、浸出液的收集处理技术等要求更加严格。但是实践表明，安全填埋也不是绝对安全的，由于建场标准不高或选场不当等因素，关闭的一些场所出现渗漏而不得不采取补救措施的例子，已经在某些国家出现。参照国外多年来固体废物管理及焚烧、堆肥和土地填埋等技术的优缺点，无论从经济、技术还是从城市垃圾的现状看，土地填埋都是一项适合我国国情的处置技术，应加以研究和推广。

第四节　生态环境质量评价

环境是人类赖以生存的重要条件，人类为了生存与发展同环境之间长期进行物质和能量的交换，在这种交换中出现了环境质量的改变，产生了不利于人类生存的环境质量问题，其中包括生态环境质量的改变。生态环境是指除人口种群以外的生态系统中不同层次的生物所组成的生命系统。生态环境质量就是这个系统在人为作用下所发生的好与坏的变化程度，或者说生命系统在人为作用下的总变化状态。人们开发、利用，甚至破坏或建设周围的生命系统，使它们发生了改变，对这些改变及其给人们的影响做出定量的分析及评价，可称之为生态环境质量评价。生态环境质量评价是环境质量评价的重要组成部分，从这种意义讲，生态环境质量评价，就是依据生态系统结构和功能状态的优劣对环境质量进行评价的一种方法。

一、环境质量与生态环境质量

环境质量已成为环境科学的核心内容，国内外都有许多专门的论述。它包括环境质量定义、分类、基准及标准、评价及预测、控制和改善等诸多内涵。生态环境质量评价当然也必须包括上述诸项内容。

（一）环境质量定义及基本内涵

1. 环境质量定义

环境质量是指环境素质的优劣程度而言，优劣是质的概念，程度则是量的表征。在积累了大量的有关环境的实际资料或监测数据之后，可以将环境的质和量结合起来，给出环境性质定量的标度。具体地说，环境质量是指在一个具体的环境内，环境的总体或环境的某些要素对人群的生存和繁衍及社会经济发展的适宜程度，是为反映人类的具体要求而形成的对环境的质及量进行评价的一种概念。环境质量首先是由环境本身质的特性所决定的，它与物理质量主要不同点是具有明显的时空变化，受人类活动直接影响，并反转过来对人群的生存及健康产生直接作用。它还可以受到人们的调控与改善。

2. 环境质量的基本内涵

环境质量包括自然环境质量和社会环境质量，本节所述及的主要是自然环境质量， 它包括物理的、化学的和生态的质量，又可具体划分为大气环境质量、水环境质

量、土壤环境质量、生态环境质量等。区域环境质量，如某城市或某大型工程，应包括气、水、土、生态等方面。

环境质量评价涉及环境质量基准和环境质量标准，环境质量的基准，一般定义为，环境因素在一定条件下作用于特定对象(人或生物)而不产生有害效应的最大阈值。或者说环境质量基准是保障人类生存活动及维持生态平衡的基本水准。制定环境质量基准有其客观依据及基本方法。

环境质量标准不同于环境质量基准，环境质量标准具有法律意义，是国家权力机构为了保障人群健康和适宜生存条件，为了保护生物资源、维持生态平衡，对环境中有害因素，在限定的时空范围内对容许阈值所做的强制性的法规。

3. 环境质量调查，监测及评价

环境质量调查是为了了解环境的质量状况而进行的一系列工作，其调查的主要内容是环境背景值、自然环境状态、区域污染状况，人类干扰下环境的演变规律，以及环境因素的危害效应等。

人们为了评价环境质量，研究确定了一系列具有代表性的环境指标，对这些指标进行定期的或连续的监视性的测定、观察称为环境质量监测。通过环境质量监测，可以分析、了解环境因素的变化过程及发展趋势，为进行环境评价、制定环境法规、进行环境管理提供科学依据。

按照一定的标准，采用相应的方法对环境质量进行评定、比较及预测，称为环境质量评价。环境质量评价首先要有较清楚的环境质量背景值或环境质量基准，然后通过环境质量调查与监测，再依据评价标准，选取适宜的方法，给出科学的评定。

4. 环境质量调控与环境质量预测

预测是对客观事物发展趋势所做的推断性的科学判定。环境质量预测，当然是对环境质量未来趋势所做的推断，环境质量预测是环境科学的重要组成部分，是制定环境法规、对环境进行科学管理，以及区域性人口、资源、生产布局的重要的基础性依据。环境质量调控应该包括狭义及广义两个方面。狭义的调控，是采取合理有效的措施，调节和控制向环境中排放的污染物不超出允许的容纳量。广义的调控，是采取人工手段，使环境要素变化不超过或能够达到一定的标准。

(二) 生态环境质量定义及基本内涵

1. 生态环境质量定义

生态环境是指除人口种群以外的生态系统中不同层次的生物与环境要素所组成的生命-非生命复合系统。生态环境质量就是这个系统在人为作用下所发生的好与坏的变化程度。

2. 生态环境质量的基本内涵

对一个复杂的生态系统，往往是从中抽取一定数量的样本进行分析推断，这样获得的生态环境质量及其评价，仅仅是“生态环境质量”实际状况的一个具有代表性的标度，因为一般情况下很难将整个生态系统全部度量分析。这里所给出的生态环境质量及其评价，实际上主要是指生态系统中生物因子之间关系变化的评价。在进行评价时需要从生物因子关系变化中选取可以标度整个系统质的参变量。

二、生态环境质量评价

环境质量评价是对环境质量优劣的定量描述。一般情况下，生态环境是一个复杂的生态系统，有其结构的时空变化，如群落结构、营养结构、优势种群的内部结构等等；有其所特有的能量过程，如初级生产力、各级能量转化、系统内的能量累积、种群生物量等等；以及功能效应，特别是对人类生存所需要的效应。如森林的释氧效应、植被的固定光能效应、水生态系统及其他陆地生态系统的蛋白质生产及累积效应等。对于受污染的生态系统，还包括污染物在生态系统内的迁移、积累、富集，以及生态系统对污染物的抵抗能力等等(金岚等 1992)。

人类为了生存与发展同环境之间长期进行着物质和能量的交换，出现了生态环境质量的改变，产生了不利于人类生存的生态环境质量问题。人们开发、利用，甚至破坏或建设周围的生态环境系统，使它们发生了改变，对这些改变及其给人们的影响做出定量的分析及评价，称为生态环境质量评价，具体地讲，它是依据生态系统结构和功能状态 的优劣对生态环境质量给予数量化的表征，并划分为一定的等级进行评价的一种方法。

(一) 生态环境质量的基准

研究一个物理系统时，有时必须确定其初始状态，方能比较物理量变化的大小。进行生态环境质量研究也必须给出初始状态，确定其质量的基准。一般的基准值都是以0或 1 表示，这里的 0、1 是最小基准值。最大基准值可根据实际情况或人们的需要来确定，也可以借助于概率论上的观念，取 0 为最小基准值，取 1 为最大基准值。

为了确定生态环境的质量，需从诸多方面选取标定“生态环境质量”的参量，即确立指标体系。这种指标体系可能仅含一个参量序列，也可能需要多个参量序列。若是后者，就有一个如何由多个参量来决定生态质量基准值的问题。

如果生态环境质量为 0，则必然是有 N 个参量皆与 0 有关；或至少有一个参量 A 为 0，而其他参量与 A 有相乘积的关系。

这里的 0 或最大基准值 1，是一个相对标度。分析者为了某一目的，首先选取初始状态，并定义初始状态的所有参量的值为 0 或 1，然后再确定终极状态值为 1 或 0，如此则可以进一步划分生态质量的等级。将生态环境质量的最大值 1 与最小值 0 之间划分为若干个状态，每个状态即可称其为一个等级刻度。

(二) 量的选择及其数量表征

应从生态系统本身的生命成分中选取可以标度整个系统质的改变的参变量。如属于生态结构方面的营养结构、群落结构，甚至涉及优势种或建群种的种群结构，种群年龄结构等等。再者，进入或作用于生态系统的异常因子的迁移、积累、富集，以及生态系统对于这些因素作用的抵抗能力也是必须考虑的。例如我国学者金岚等(1992)在对第二松花江生态状况进行质量分析时，曾选用了群落结构，主要经济鱼的年龄结构，江体内浮游生物、底栖动物、鱼类资源的单位空间生物总量(湿重)，汞、铜、锌、酚在几种较有代表性的生物体内的含量，主要经济鱼类环境最大容纳量等六个方面，各为一个生态参量，然后综合在一起刻画生态质量。

依据生态状况调查，将所分析的二松江分为五个江段，其中吉林市区的哈达湾是主要污染区，为分析生态环境质量的起点江段，编为 0 号江段；哈达湾至哨口称九站江段，为 1 号；哨口至红旗，称渔楼江段，为 2 号；红旗至饮马河口称松江(村)江段，为 3 号；饮马河口至曾盛为五家(站)江段，为 4 号；曾盛至三江口为平风江段，为 5 号。

在江段划分以后，假设各江段交界面处，在最小面积单元 dS 上瞬间的生态交换量是相等的。于是每一个江段都可以近似的作为独立的封闭体系处理。

以吉林市以下松花江为例，首先确定二松江生态环境质量的基准。由于拟分析工业污染造成的二松江生态环境质量改变，所以应以未曾受污染时刻江段的生态环境质量为极大，即生态环境质量 Q=1。如果缺少未受污染时的生态资源的基础资料，那只能采用目前二松江下游未受或轻微遭受污染江段的生态状况做类比分析，令其 Q=1。如此可知，污染最严重使整个江段无水生生物生存，或极少有水生生物生存的江段，其生态环境质量 Q=0。

这里选取了生态环境质量的两个端点的基准值，于是可以进行质量梯度的划分。刻度划分有两个问题：一是划分梯度的依据；二是刻度的精度。划分刻度可依据生态实际状况，也可按照人们需要。仍以二松江为例，这里选取了生态环境质量的两个端点的基准值，于是可以进行质量梯度的划分刻度。自吉林市至平风江段末端的生态状况如下：吉林市哈达湾江段基本无鱼类生存；哈达湾至九站可见有鲫鱼及底层石首鱼生活；九站至鱼楼江段除上述种类外，杂鱼的种类及数量明显增加；鱼楼至松江有数量较多的鲤鱼、鲢鱼、鳙鱼……于是可依据生态状况划分 5 个或 10 个等级。

刻度的数量是由评价精度来决定的，这同温度计的刻划是相似的，可以根据需要将 1000° 划分 10 个等份，每份 100° ，也可以划分 100 个等份，每份 10° ……如果要在第二松花江深入发展养鱼事业，那就要仔细划分江段，刻度可能要划分 10 份。如果只是为了分析污染影响的最大范围，则仅需要将江段划分为两份即可。商定污染最大范围的定义性的指标，可根据这一个指标将江段划分为两段，比如凡是没有鲤鱼生存的江段为定义性指标，定义污染江段。于是渔楼以上及以下可划分为两个江段。由此可见等级精度的确定，一般是依评价需要而定。

（三）常用生态环境质量评价模型——Malthass 模型

该模型是 Malthass1945 年用于生态格局分析的模型，主要用于刻画 n 维空间点的位置，该模型与要评价的生态环境质量有相似的形式。如果从生态指标中选取几个参量，则参量变化过程，也是生态环境质量值的空间位置。

假如选取 5 个参量，分别记为 P、I、M、Z、K，生态环境质量与参量的关系有着质的内在联系，每个参量的数值变化都可以在一定程度或某个角度标明生态环境质量状况，于是生态环境质量 Q 与 5 个参量之间有以下关系：

$$Q=\Phi(P、I、M、Z、K)$$

如果给出或找到“Φ”的表达形式，则 Q 就可以给予评价。

（四）生态环境质量评价中的指标体系

要对一个生态系统进行全面评价是很不容易的，因为一个大系统包括许多既互相联系，又千差万别的子系统，因此，要建立一套包罗万象的评价指标体系非常难。再加上同属一个生态系统类型而由于时、空的差别彼此差异很大，不能袭用一套指标体系，这更增加了问题的复杂性。下面是参考指标：

1. 城市子系统

这是最复杂的子系统，涉及面广，指标应包括以下 8 点：

① 工业发展水平、工业结构和资源利用的合理程度，物质和能量投产比，产品质量；

② 城乡、工农业之间物质、能量流通效率，转化利用效率；

③ 污染性质、程度、范围，绿化程度、环境质量；

④ 卫生条件，健康水平；

⑤ 人口增加率；

⑥ 人均收入，年增长率；

⑦ 文化教育、精神面貌、道德品质、社会治安；

⑧ 名胜古迹，旅游资源。

在这些指标中根据具体情况进行加权，例如，工业城市在①、②、③项指标上要加分，历史文化名城则要强调③、④、⑦、⑧项，要加分。

2. 农田子系统

主要以第一性农业生产为主，应强调能量转换率和利用率。

① 第一性生产者(绿色植物-作物)光能利用率和转换率。农业结构组合和配置特点(包括农、林、牧、副、渔及各业内部品种组合)。

② 第一性生产者和第二性生产者投产比，能量物质转化率。
③ 农业产品的产量、质量。
④ 土壤肥力，施肥品种，组合；病虫害及农药施用量；土壤及农、副产品中农药、重金属等残留量。
⑤ 乡镇企业发展情况，企业类型；物质、能量利用、转化率；产品质量。
⑥ 乡镇企业污染情况。
⑦ 城市物质、能量流通交换特点及效率。
⑧ 生物能源的开发利用如沼气、节能灶、太阳灶等等。
⑨ 居民人均收入及增长率，支出特点，文化教育等等。

3. 山地子系统

这是以森林覆盖率，山地副业利用及水土保持为主要特征的子系统，应包括以下主要内容：
① 植被覆盖率，特别是森林覆盖率；植被类型、结构、种类的多样性。
② 水土流失及其特点。
③ 山地副业开发利用。
④ 山地农业的结构特点，组合的合理性；光能利用率；产量及品质。
⑤ 野生动物资源，鼠害等。
⑥ 乡镇企业及采矿业发展的特点及对环境的影响。
⑦ 居民人均收入及增长率，支出特点，文化教育等等。

4. 水域子系统

应强调水资源合理开发利用：
① 水产养殖业的结构、配置的合理性，水产植物及鱼等产量、质量。
② 水质：BOD_5、COD、DO，NH_4-N、NO_3-N，氯，CO_3^{2-}与 HCO_3^-，细菌总数、大肠杆菌数，农药，重金属含量，硬度。
③ 水域自净能力。
④ 水资源合理利用情况(饮用水、农用水、工业用水、旅游用水)。
还可区分很多子系统及更小的系统，在每一个子系统中的各项指标，根据具体情况给以权重分数(打分)，再根据实测的结果给以分值。把每个子系统的各项指标值叠加成子系统的指标值，再把各子系统的指标值叠加成整个生态系统指标总值，这样就能综合反映该系统及子系统的质量，并能预测其发展趋势(王焕校　1990)。

三、生态环境质量预测

环境质量预测，是环境科学的重要组成部分。其中生态环境质量预测应是不可缺少的内容。由于预测是一个专门的学科，所以生态环境质量的预测，首先必须遵循预测科学的基本原理、主要原则、基础方法及一般过程。其次要遵循环境质量预测的理论、原则及方法等等，当然生态环境质量又有其自身的许多独特的理论、原则及方法。

科学的预见是人的正确行动的前提，人类在自己历史过程中，积累了极其丰富的预测实践经验，形成了科学的逻辑思维过程，创造了系统的预测理论及方法，为生态环境质量预测提供了足够的科学依据。

(一) 预测的基本原理及方法

预测主要是对未来做出科学的定性或定量判断。所谓科学的，是依据事物内在的本质规律，正确地给出可信度较高的推测。一般说来，事物的发展和变化，主要决定于自身所固有的内在的本质规律，认识和掌握了事物的这种规律，也就认识了事物的未来。生态环境质量当然也有其自身的内在本质规律，因此了解与掌握了这些规律，也必然可以正确地预测生态环境质量的状况。

预测的方法一般有专家判定、特尔斐技术、类比推理、趋势外推及动态系统分析等方法。特尔斐技术实际也是一种专家判定，但它强调匿名性、反馈性和统计性，所以具有较强的生命力，有广泛的应用，预测都是要由人来进行的。人们必须尽力了解与掌握事物本质的信息，选取适宜的方法，采用科学的逻辑思维进行正确分析，最后给出明确的结论。正确的预测，必须经过实践的反馈检验，并对检验做出进一步分析，为下一次预测提供重要的经验。

(二) 环境质量预测

环境质量预测就是根据环境质量的内在规律及现实状况对未来发展变化做出推断。这种推断仅是趋势性分析，虽然采用定量的数学公式或其他现代化手段，如计算机等，但获得的结果仍是一种大致的估算。预测中，在建立数学模型，选择预测指标，估计模型参数以及进行数值计算时，都对现实情况作了一定的假设与简化。预测结果具有十分重要的价值，但是在运用预测结果解决实际问题时，只能将其作为重要依据，不能完全依赖预测结果，要与其他方面所获来的信息相互佐证，全面分析权衡，合理做出决定。

目前所做的环境质量预测基本是大气环境质量、水环境质量及土壤环境质量三个方面。关于生态环境质量，虽然涉及的范围较广，如草原退化、土地沙化、植被减少、物种灭绝等等，但人们认为目前只能“定性或半定量地对地区生态环境质量进行评定”，认为“如能建立生态因素与环境质量间或社会经济间的损益关系，特别是函数关系，进行定量的评价，是最为理想的”。但“这些函数关系的建立往往十分困难，大多是边探索边进行，目前尚缺乏能适应这一评价要求的普适模式”。由于这种情况，所以还难以找到更恰当的生态质量预测的例证。

第五节　环境建设的生态设计

一、环境建设生态设计的必要性

环境保护本身是一项生态事业。它是从 20 世纪 60 年代环境污染和生态破坏成为严重问题以后才受到广泛重视的新概念和新的社会实践。最初它是被当作环境污染单项治理的工程技术问题对待的。当时，环境保护工作主要是通过工程措施，建造各种清除污染的装置，实施对个别污染源的控制或个别污染物质的清除。

实践表明，发达国家利用它们雄厚的经济和先进的技术，采用上述途径也取得一定的效果，一些严重的污染得到了控制，环境质量有所改善。但是又出现许多新问题。例如：① 在生产条件下采用工程措施，污染物质的去除率一般不超过 25%，因而它不能完全控制污染物质进人环境，只是起到了某种缓解作用；② 工业生产迅速发展，不断地出现新的污染物质和新的污染形式，技术措施跟不上形势的这种发展；③ 采用工程措施一般需要投人相当于企业建设投资 10%~25%的资金，随着需要采用越来越先进的治理技术而需要更大的投资；④ 大量处理污染物质的工程的运转(如大型污水处理厂)消耗大量能源，从而制造了新的污染。

因而，采取单纯技术处理措施不仅代价太高，而且不能根本解决问题，从而使环境保护工作陷人困境。为了摆脱困境寻找新的出路，人们转向生态方法的运用，对环境建设进行生态设计。佩切伊在《人的素质》一书中认为人类有六项使命，其中第五项使命是通过制定世界生态计划的办法保护人类的生存环境。

二、环境建设生态设计的方法

对环境建设进行生态设计，最主要的是采取如下措施。

1. 环境综合整治

主要指区域环境综合整治。它要求把某一区域作为完整的“社会-经济-自然复合生态系统”(social-economic-natural complex ecosystem)，从区域环境规划人手，通过合理布局使生产结构、能源结构、经济和社会结构合理化，把区域环境建设纳人区域建设的总体规划，使环境治理与基础设施建设结合起来，把经济建设与环境保护结合起来，实现社会-经济-环境协调发展。当然，根据具体情况需要建设一定的控制污染的工程设施。但是，同时要通过改革工艺、废物循环利用、加强环境管理、健全环境保护立法、加强环境教育、发展环境科学技术等多种手段，实施对环境的全面整治。我国经验表明，首长(如省长、市长)对环境质量负责制度对搞好区域环境综合整治具有重要意义。

2. 改革工艺实行生态化生产

环境污染说到底是人类浪费资源造成的。人类社会物质生产的传统工艺是非循环系统，是生产废物的形式。它的图式是“原料-产品-废料”。生产过程中大量废弃物没有进人生产周期，而离开生产过程进人环境。这样必然造成环境污染和资源浪费。但

是，自然界的物质生产过程是无废料生产方式。它的图式是“废料-原料-产品”。它通过物质循环系统，投入生产过程的物质不断循环、转化、再生，使生产过程保持动态平衡状态，不会产生资源枯竭和生态退化的问题。因此，模仿自然物质生产过程，用生态工艺代替传统工艺，例如采用生态共生工艺(多行业共生、城郊共生、工农商联合多种经营等)，循环再生工艺(物质和能量分层和多级利用、无污染工艺等)，生物工艺(生物自净、生物能源利用等)，实施生态化生产。人类社会的物质生产补充废物还原和废物利用的目标。这是最终解决环境问题的途径。

3. 利用自然净化

在漫长的人类历史上，人类的生产和生活过程不断向环境排放废弃物，但是并没有出现严重的污染现象。这是由于生态过程的作用，特别是微生物的分解和转化作用，消解了废弃物质。这就是自然净化。但是，产业革命以后，随着工业生产发展向环境排放的废弃物质大量增加，它超过了自然净化能力甚至破坏自然净化能力，从而出现严重的环境污染现象。

自然净化是人类的一笔巨大财富。为了保护和利用这笔巨大财富，第一，要减少废弃物排放，使它限制在生态过程容许的限度内；第二，通过合理布局，可以利用大气、水体对污染物质的稀释、扩散和分解作用；第三，增加绿地面积，充分利用植物净化空气和土壤的作用；第四，兴建生态工程，培育和选择去污能力较强的生物品种，实现清除土壤和水体污染物质的作用。例如，中国科学院应用生态所“沈阳镉土地区生态工程研究”表明，木本植物对土壤镉有较高的吸收富集能力，有些树种在一个生长期内吸收积累量超过其背景值的 10 倍以上，土壤被绿色植物覆盖后对其中的镉有消减净化作用，而且树木生长正常。土壤镉被植物吸收后，大部分积累在植物体内。这样的树木作为木材使用，镉与食物链脱离不参与生物小循环，因而它是理想的生物积累器。

又如，以各种植物和微生物为基础的污水处理工艺已在我国和世界各国广泛使用。如“污水-水葫芦-蚯蚓-貂”生态系统，用水葫芦净化污水，用蚯蚓处理污泥和水葫芦，把已经受到污染的蚯蚓用来喂貂，养貂的产品是貂皮，貂肉用来喂貂，貂粪用于养蚯蚓，这样污染物质从食物链分离出来，既净化了污水又有产品输出(貂皮和净水)。同常规污水处理厂比较污水生态处理工艺是投资省、运转费用低的经济有效的方法。

合理利用大水体的自然净化能力，在降低污水处理费用(节省基建投资和运转费用)和保护供水水源方面有重大效益。例如，华盛顿位于波托马克河东岸，该河接近海口，水量又大。从 19 世纪以来，该市污水都是通过雨水管道排入河内，依靠河流自净能力净化污水。据计算，该河自净能力能消解 50 万人口的污水。因而只是在该市人口增加、污水量增大以后，河流自净能力达不到要求时，才在 1935 年兴建一级污水处理厂，1949 年扩建二级污水处理。它与河流自净能力配合处理了 100 万人口的城市污水。

因此，自然净化在环境综合整治中占有重要地位，保护和合理利用自然净化能为建设优美的人类环境服务。罗马俱乐部主席佩切伊认为，人类在地球上生活，主要有两种可供自己处置的资产：一种资产是人类的智慧，另一种资产是全球环境。合理利用这两种资产不仅关系到当代人的福祉，而且关系到人类的未来。我们必须采取十分负责任的

态度，有责任把一个更好的世界留给后代。

第六节　环境生态工程

生态工程是在 20 世纪 60 年代以来全球生态危机的爆发和人们寻求解决对策以及强调资源环境保护的背景下应运而生的，它是应用生态学中一门多学科渗透的新的分支学科。

一、环境生态工程的概念

生态工程一词是我国学者马世骏早在 1954 年就提出来的，而公认的生态工程思想和生态工程名词是在 30 年前才提出。马世骏(1984)为生态工程下的定义是：“生态工程(ecological engineering)是应用生态系统中物种共生与物质循环再生原理、结构与功能协调原则，结合系统分析的最优化方法，设计的促进分层多级利用物质的生产工艺系统。生态工程的目标就是在促进自然界良性循环的前提下，充分发挥资源的生产潜力，防治环境污染，达到经济效益与生态效益同步发展(图 8-7)。”生态工程与环境工程的最大区别在于：生态工程考虑利用生态系统的自我设计特点，是有利于人类和自然两者的设计。而环境工程则是利用一系列科学原理，去净化或防治环境污染。与传统工程相比，生态工程是一类低消耗、多效益、可持续的工程体系。环境生态工程是以治理生态环境为主的生态工程，兼有二者的特点。

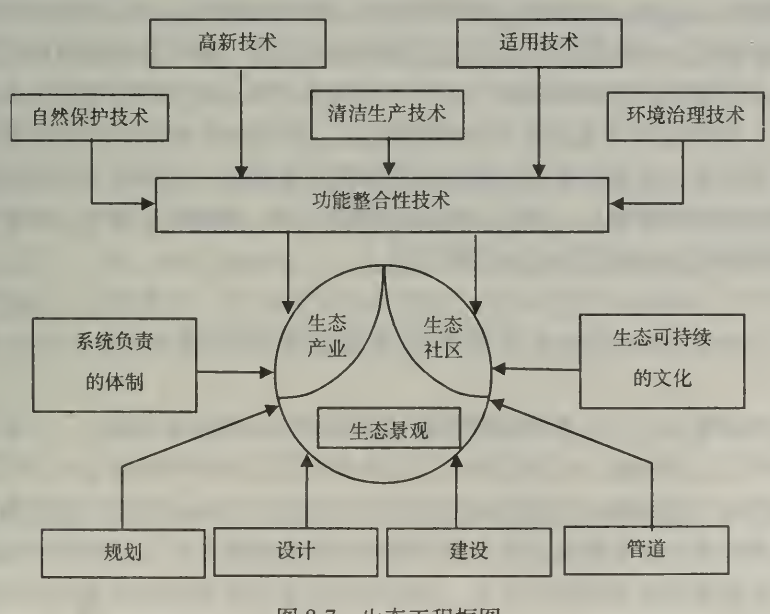


图 8-7　生态工程框图

二、环境生态工程学原理

运用生态控制论原理去促进资源的综合利用、环境的综合整治及人类社会的综合发展是环境生态工程的核心。我国学者(马世骏 1986, 颜京松 1986, Ma and Yan 1989, Yan et al. 1992)在系统生态学理论的基础上，根据我国朴素的生态工程实践经验，把生态工程原理总结为整体、协调、自生、再生循环等基本原理。

生态工程是以整体观为指导，在系统水平上来研究，整体调控为处理手段。虽然这样研究与处理是比较困难的，但却是必要的。整体理论是综合了解系统，如生物圈、生态系统整体性质，及解决受威胁区域以致全球生态失调问题的必要基础。当然这并不意味对组成成分的研究和处理是多余的，因为对各成分的性质及其他成分相互关系的了解越多，对系统的整体性质就能更好的了解。

由于生态系统长期演化与发展的结果，在一定时期内均具有相对稳定而协调的内部结构和功能。然而，任何超越一个生态系统自我调节能力的外来干涉，均可破坏结构间协调、或功能间协调、或结构与功能间协调，导致该生态系统的原有性质及整体功能的破坏和改变。因而，维护生态系统结构与功能的协调性是生态工程的重要原则。

自生原理包括自我组织、自我优化、自我调节、自我再生、自我繁殖和自我设计等一系列机制。自然生态系统的自我设计能力是生态工程中最主要的基本原理之一。通过设计，能很好地适应对系统施加影响的周围环境，同时系统也能经过操作，使周围的理化环境变得更为适宜。

在生态系统的物质循环中，每一个环节是给予者，也是受纳者，循环是往复循环， 周而复始。正是由于这些生态系统内的小循环和地球上的生物地球化学大循环，保障了存在于地球上的物质供给，通过迁移转化及循环，使可再生资源取之不尽，用之不竭。但是，当生态系统受到破坏，从循环论的观点看，是废物大量产生或某些再生资源开发过度，而阻滞、干扰了正常的循环途径，循环失调与失衡，导致大量废物的产生，最终造成污染、环境破坏。生态工程就是要采取措施，调整循环运转的各个环节及途径，协调这些环节的输入、转化与输出的物质的量，使废物资源化，为物质生产和生物再生提供更多机会，变废为宝，化害为利。

(一) 自我设计与自我完善原理

生态工程所涉及的生态系统和自然界自我设计与自我完善的概念，主要是指生态系统的自我调节与反馈机制，也就是使生态系统具有适应各种环境变化并进行自我修复的能力，以此保证生态系统的功能发生最低程度的变化。Odum 把这一现象描述为“自我组织”，马世骏和王如松等在污水处理的研究中则把它称之为“自我净化作用”。

通常，生态系统自我设计的能力，对于解决生态破坏和环境污染问题起着非常重要的作用。例如，有毒废弃物是许多工业国家难以解决的重大环境问题。尽管这些有毒废弃物今天已被禁止堆放或生产，但 10~20 年前它们并没有得到有效的控制。因此，许多工业国家由于堆放或生产这些有毒化学品，导致了严重的土壤污染。所有这些污染的土

壤能够被移动到另一处产生危害较少的地方，但这样做的代价是极为昂贵的，也不被持生态学观点的人所接受。

如果我们积极运用生态系统的自我设计能力，发现并应用对土壤中存在的污染物起降解作用的特异微生物，就较容易解决土壤污染的问题。甚至土壤中存在的重金属，我们也可以应用对重金属有特异吸收功能的植物以及植物菌根，来解决土壤的重金属污染问题。

对于城市生态系统，密集的人类活动和复杂的交通运输会产生一定数量的二氧化碳、一氧化碳、氮氧化物、硫氧化物等污染物，而城市生态系统中的绿化树种会吸收、同化这些污染物，也就是说，正是城市生态系统的这种自我设计能力，促进了城市的可持续发展。相反，城市生态系统如果缺乏这些绿化树种的吸收、同化作用，这些污染物就会积累起来，其浓度就会达到人体难以耐受的水平，最终影响到城市的可持续发展。

（二）物质循环与再生原理

生态系统中的任何物质(包括污染物质)，都以循环的方式在不断地进行运动。这种循环极大地促进了系统的进化和生命的活力。城市水体中营养元素氮的循环，就是一个实例：从以生活污水形式排入水体的氮开始，到人体以食物的形式吸收氮，其间经历了许多复杂的生态过程，包括水中氮的生物化学转化、藻类对氮的吸收作用、藻类的死亡与腐解、氮的矿化作用、浮游动物以藻类为食、鱼类捕食浮游动物，以及人捕获并食用鱼类，从而完成一个极其复杂的循环。

环境生态工程方法强调这种物质循环与再生，其主要的目标就是为了减少环境的污染效应以及节省自然资源，特别是减少非再生自然资源的消耗。例如，城市中产生的大量生活垃圾，其中的废铁、废铜以及玻璃瓶子，可以回收再利用；而那些有机组分，可以经过堆肥作用，用于肥田，这就是这一原理最为简单的应用实例。

不仅如此，生态工程方法还通过系统模拟达到物质循环的最优化。例如，城市径流中常含有大量的营养物质(特别是氮)，如果它们排入水体，则会导致城市水体的富营养化；如果它们进入土体，则会影响地下水水质。为了防止地表水体的富营养化和氮对地下水的污染问题，必须考虑：① 温度对硝化作用，反硝化作用的影响；② 土壤的吸附能力；③ 植物的丰度和根系状况。通过系统优化，可以达到消除氮污染的目的。

（三）生物与化学多样性原理

生态系统通过自我调控与反馈机制，使外在影响因素的变化适应于内在功能的变化。调控机制大都与系统中生物物种的多样性有关。这就是说，生态系统所拥有的生物物种种类越多，其具有的缓冲能力就越大。例如，在一定的时空内绿色植物对光合作用的维持能力，是系统中所有绿色物种种类的函数。

化学多样性与生物多样性同等重要。因为，对于一种生物，其生长必需的化学成分存在于其生长的环境中。否则，这种生物就会死亡甚至导致物种的消失。在这种意义

上，生物多样性又受到化学多样性的制约。

在城市生态系统中，如果社区内的人口大量猛增造成建筑物之间的密度过高，而相应的绿色空间又突然消失，其生物多样性明显下降，那么供人呼吸的氧气浓度就会不足，即通过化学多样性的减少，影响到人居环境的健康持续发展。相反，如果我们既考虑到各建筑物之间的密度，又考虑到有一定数量的绿色空间、便利的交通和其他基础设施作为基本保障，那么就会促进该城市的可持续发展。

(四) 系统结构与功能从属原理

生态系统的生物和非生物结构，最终取决于该系统所受到的内在和外在作用力，例如，温度、pH、Eh、化学流、水流和空气流(包括风)等。

近年来，在我国许多城市，尤其是在夏季，持续的高温使城市中许多物种消失，包括有些绿化物种枯死，相反，那些耐高温的生物(例如老鼠、蚊子)却大量繁殖起来。特别是为了达到消暑纳凉的目的，一些城市还改变了建筑物的结构和走向，专门添置了避暑的场地。可见，夏季的持续高温改变了城市生态系统的物理结构和生物结构。又如，我国沿海地区常常遭受强热带气旋袭击，城市中大量的绿化树种被连根拔起，有的树枝全部刮断，最后造成大量树木和绿化植株死亡，使本来就少得可怜的绿色空间更加缺乏。有鉴于此，我们在进行城市可持续发展的规划和设计时，必须对施加于城市生态系统的内在和外在作用力进行系统的考察，以防止不利于城市可持续发展事件的突然发生。

(五) 系统功能与化学组成相一致原理

生态系统的自动平衡，需要生物学功能与化学组分相一致，事实上，动物、植物、微生物，甚至包括人类，尽管它们的化学组成在浓度上有一定的范围差异，但正是因为它们具有各自不同的化学组成，才有它们各自不同的基本功能。

生态工程方法的成功之处，取决于对这一原理的理解和正确应用。例如，城市生活和工业燃烧以及汽车尾气的排放，使得硫氧化物不断进入大气圈，它们又以酸沉降的形式进入地面，化学组分的改变导致了水体的酸化、建筑物的侵蚀和森林的死亡。如果我们对硫氧化物这一化学组分进行适当的控制，就不会出现这种不良的现象。

(六) 整体性原理：相互耦合与相互联系

任何生态系统都是开放系统，随时都与其环境进行着物质和能量的交换。因此，生态系统与其环境相耦合，是生态系统的基本属性。如果我们把某一组分从一个生态系统转移到另一个生态系统中，而这一组分对另一生态系统有害的话，问题就会严重。例如，在我国北方许多城市(例如北京)，垂柳是一种受欢迎的城市绿化树种，被大量栽种。然而，到春天时柳絮大量产生，造成了严重的大气污染。又如，在西方许多国家的

城市里，人和动物和谐相处，这是一件好事。可是，狗、鸟类(乌鸦和鸽子)的粪便难于处理，却常常令人难堪。生态工程方法必须考虑生态系统与其环境的相互耦合，以避免上述不良情形的发生。

而且，生态系统中的任何组分，都是直接或间接地发生着相互联系。系统中一种组分的改变，必然会引起另一种组分的改变。有时，还会发生一系列的连锁反应或生态效应。例如，当一些人从城市中心迁移到郊区居住，这不仅改变了郊区土地的使用功能，而且还导致了城市中心的不断衰落。与此同时，还必须进行交通、道路的基本建设，耗费大量的自然资源，生态工程方法必须能够注意到系统成分改变之间的关系。例如，在南方一些城镇，夏天苍蝇很多，主要是通过消除露天粪坑以及对粪便进行无害化处理，即通过改变城镇系统中的某些基本成分，来达到消除苍蝇污染的目的。

(七) 生态过程的时间尺度原理

完成一个生态过程，往往需要一定的时间。因此，通过生态工程方法来解决生态环境问题，必须有一个观察、检验的过程。例如，人类由于对被捕食者-捕食者相互关系方面缺乏长期的战略考虑，通常是把食肉的捕食者作为有害的动物予以消灭，而把食草的被捕食者保护起来。其实，这是一种短期行为，因为食肉的捕食者对于人类来说，也同样是有价值的动物，也应当受到保护。

又如，Hutchinson(1961)最早描述的水生生态系统中“浮游生物的自相矛盾”现象，就表明时间尺度的重要性。他认为，在基本均一的环境中，浮游生物形成了多样的物种。而 Kemp 和 Mitsch(1979)的结论是，多样性物种的形成，或许需要一个受到周期性扰动的环境：当扰动频率的变化基本接近生物周转的时间，则生物的多样性可以得到维持；相反，当扰动频率加快，生物多样性就会大大减少。可见，时间尺度对于生态工程建设是极其重要的。

(八) 生态组分的空间尺度原理

世界人口的迅速增长使人类对农业土地的需求量大为增加。于是，人类便大规模地进行森林砍伐，而且还通过排干湿地中的水，把大量的湿地转化为农业土地。由于森林砍伐和排干湿地，土壤直接受到太阳光的辐射，其中的有机质逐渐消失，导致土壤肥力下降。在许多地方，由于居住的需要，许多通过长期培育的农业土地又被辟为城市居民的居住用地。

生态工程方法特别注重作为重要生态组分的土地在利用上的空间变化。例如，对于城市附近的湿地，主要以强调保护为主；对于缺乏绿化的城镇，则主要强调留出绿色空阔地。

(九) 生态系统变异性原理

生态系统有其一定的地理范围和边界。当一个适宜于在非洲生长的物种，突然被移植到欧洲，它不一定适应当地的生态条件。同样，一个适宜于在欧洲生长的物种，也不一定适合在中国种植。这是生态系统变异性起了作用。

物种在生态系统的过渡地带形成交错群落，因而过渡地带是两个生态系统的缓冲带。在这个缓冲带生存的物种，基本能够同时适应这两个不同的生态系统及其不同的生态条件。这也是生态系统变异性起了一定的作用。

对于城市生态系统，人居环境与自然之间的界面，应该作为特定变异的过渡区来进行设计和建设，这无疑也是生态工程的基本原理之一。

生态系统变异性原理，要求我们在进行城镇建设时，不能千篇一律，必须依据当地生态条件来决定城镇发展的战略和重心。例如，对于缺乏水资源的地区，必须限制城市发展的规模，特别是为了解决生活饮用水的问题，居民人口数量不能过于庞大，更不能引入需水量大的工业企业。

但是，任何一个成功的或优秀的工程，首先必须有一个科学完善的设计，而要想达到科学完善的设计就必须严格地遵循有关科学原理来进行，环境生态工程也不能例外， 它也离不开有关科学理论的具体指导。虽然生态工程尚属于一个有待逐步开拓和完善的新学科，其中很多问题还有待不断丰富和完善。但要进行生态工程设计，起码必须遵循几个基本原理：系统科学或系统论原理、生态学原理、社会经济学原理和工程对象的有关专业学科的一些基本原理(王如松等　2000)。

三、环境生态工程的模型与模拟

生态工程的结构分析、综合评判及方案设计，存在着许多必须进行定量研究的问题，如生物种群结构的优化选择与组合、生态工程总体结构的优化设计问题、生态工程综合评判指标的数量化问题、病虫害生态防治的预测预估问题、生态工程系统分析问题等， 都需要用数学方法及数学模型得以解决。为此，这部分主要介绍一些适用于生态工程定量研究的数学方法、数学模型及其应用，它们适合于所有的生态工程，包括环境生态工程。

生态工程数量化方法及其模型的研究，必须以数学理论、数学生态学、计算机技术、林业学及生态工程理论的发展为基础。目前这项工作，国外研究较多(云正明等 1999)。

(一) 生态工程的系统分析模型

从广义的范围讲，系统分析不能称之为一种数学技术，而更应该是一种进行科学研究的策略，它以一种系统的、科学的方法找出生态系统内各组分之间的关系、各组分内不同影响力。如外界环境因素间的关系，帮助决策人找到一种解决复杂问题的思路。然而，这种关系作用的结果使科学家们建立了一系列反映事物发展规律的模型，与数学结

合起来。Pielou(1969)指出“生态学本质上是一门数学”。其实，作为研究生物与环境关系的一门学科，更确切地说从它诞生之日起就是一门系统科学。因为无论是个体生态、种群生态、群落生态，还是生态系统、生物圈生态，所要研究的对象都是一个系统，研究系统内各生物要素与环境要素之间的关系，研究其不同的组织层次的结构与功能。系统科学与生态学的结合，表现在人类建立的数学模型上。

早期由于计算工具的低下，以及个体生态学发展的限制，对种群的发展规律以及种群与环境之间的规律了解很少，模型主要限于解决简单问题，反映生态系统内组分之间、组分与环境之间的简单作用规律。如反映温度、光照条件、空气湿度、降水等与植被、动物、微生物生长关系的模型；反映猎物与被捕食者关系的模型；种群之间由于相互作用对环境因子的影响模型，即主要解决生态系统内种群与环境之间以及种群与种群之间的作用关系，而特别是环境与生态系统内种群发育、增长之间的关系等等。这些模型的建立，解释了生态系统内部组分之间、组分与环境之间的简单规律，在生态学发展的初期非常必要。但其缺点是都过于简单化，例如，分析因为猎物的捕食对被猎者种群的影响，仅考虑了由于猎物捕食对被捕食种群的影响，环境的影响、其他猎物种群的影响，以及其他被捕食种群的影响等被忽略掉，得出的模型虽然反映了两个种群之间作用规律，但无法真正用于解决系统研究中的实际问题。而生态工程的本质就是要解决实际问题，解释生态系统内部复杂的作用与反馈关系，寻找解决生态系统内部结构与功能上的问题，使之更优化。

近年来随着计算机技术的不断改进、新软件的逐渐开发，计算机成为目前各学科发展的重要手段，也为生态工程的设计提供了重要手段。它使得生态学家可以应用系统分析的方法建立物种之间、物种与环境之间相互作用关系的模型。

计算机的应用使得生态工程中许多极其复杂的问题简单化。如生态学中，关于种群之间的关系模型，实际系统中的物种繁多，作用多样，因而，不可能用简单的计算加以解决。但如果对各种群之间的相互作用规律了解，对组分与环境之间的作用规律了解，那么可以通过计算机建立复杂的计算机模型，模拟在瞬间上系统内各种群之间的相互影响以及受环境的影响程度；研究种群之间的动态；通过许多个瞬间的研究了解生态系统进化与演替的规律；了解生态系统内物质与能量循环的规律，那么在生态工程的具体操作中，就可以针对种群之间的发展趋势、生态系统物质与能量循环中的不足环节及时调节生态系统的生物种群，协调生态系统的结构及功能，就可以为生态系统的持续性提供最佳方案。

例如，在农业生态工程中，就可以利用植物、作物、树木对土壤水分的吸收利用规律，利用叶面积指数、植物根系的分布规律、土壤的物理参数、气候的各项参数，建立作物、林木生长与土壤水分利用之间的关系模型，为生态工程的建立、演替，农业生态工程的管理提供指导，在这一方面，澳大利亚科工组织建立的关于土壤水分的 Waves 模型，瑞典 Uppsala 大学的 SOIL 模型就为我们提供了关于植物吸水模拟的很好例子。这些模型都借助系统分析的方法找出所研究的生态系统内土壤水分循环与环境因素之间的关系。如降水、植被蒸腾、土壤蒸发、土壤水渗漏等与土壤性质、植被的生长状况、气候因素等之间的关系，而建立的复杂模型，通过计算机解决系统内部各环节之间错综复杂的相互关系。澳大利亚耕作灌溉公司就尝试通过建立模型的办法，模拟土壤中水分

的移动规律，从而根据农田不同土壤层次中水分的变化情况指导农民灌溉。同样，瑞典 Uppsala 大学的 SOIL 模型，就可以模拟生态系统内生物对氮素吸收、释放的规律，模拟生态系统内氮素循环的规律，从而根据这种模型的进度使科学施肥成为可能，这些都可以被用于生态工程的设计和管理。

生态工程的系统分析模型是反映生态系统发展变化的一类数学模型。目前比较广泛采用的是微分方程模型(动力模型)、矩阵模型、随机模型、多变量模型、突变量模型及对策论模型。

(二) 生态工程的结构优化方法与数学模型

由于生态工程结构的多样性，因而不可能有一种固定不变的优化设计模型的模式， 只能针对具体的问题采用不同的方法建立相应的模型。目前按建模技术的基础理论来源，可将优化理论的数学模型粗略分为两大类：① 运筹学模型，主要包括线性规划、非线性规划、整数规划、动态规划、目标规划；② 控制论模型。

(三) “综合评判”生态工程的数学模型及方法

所谓综合评判，就是借助模糊关系，考虑与被评判事物有关的各个因子影响后，对事物做出总评价。

在生态工程中也存在着大量的综合评判问题。例如，东北地区的林参草药的森林立体经营模式有 10 多种(林-参、林-药、林-草、林-菌、林-菜等)，单从经济效益或生态效益或可行性方面进行评价，这 10 多种模式各有优缺点。如何进行综合分析，确定哪一种模式最优，在不同条件下，使用何种模式使得总体功能最佳，这就是一个模糊综合评判的问题。

(四) 系统动力学方法及其在生态工程中的应用前景

系统动力学也有人称为系统动态学，是一门分析研究信息反馈系统的学科，也是一门认识系统问题和解决系统问题的交叉的、综合性的新学科。它研究的对象是各种各样的动态系统，且常常是包括人的因素在内的反馈系统。它的发展主要基于系统论，吸取了控制论、信息论的精髓，并依赖于电子计算机技术的发展与进步。从系统方法论来说，系统动力学是结构的方法、功能的方法和历史的方法的统一。它根据系统的结构运行特点对系统的发展、变化提出问题，由此确定目标，从目标出发按系统运行的宏观方向考虑因果关系，形成系统的结构模型，然后赋予模型参数以不同数值，让模型进行具体运行，从而对系统获得深入的理解，了解实现目标优化可能采取的种种控制手段，使决策人取得多种推动系统运行的决策信息。

系统动力学一个突出的优点在于它能处理高层次、非线性、多重反馈复杂时变系统的问题。其解决问题的独特一环就是建立数学的规范模型，从系统内部的微观结构入手

进行建模，借助计算机模拟技术以分析研究系统结构功能与动态行为内在关系以及解决问题的对策。它不过分依赖于数据，这对于处理许多非线性的、时变的复杂系统十分有利。当数学规划、统计数学模型在处理数据少或数据随时间变化的问题显得束手无策的时候，系统动力学方法却可以应用自如。

系统动力学的概念与方法比较早地应用于生态科学研究中，其中最简单的是捕食者与被捕食者的关系问题。这是一个二阶系统，它可能产生振荡的行为模式。但是，在现实生活中，多数捕食者-被捕食者系统并不产生持续的振荡行为，而是随时间的推移趋于均衡状态，这与 Volterra 原理与模型所预示的振荡行为模式不完全一致。原因在于 Volterra 推导方程时未考虑捕食者与被捕食者各自种群内部食物竞争的影响。只需把这一因素的作用引进原方程就可以得到更一般形式的捕食者-被捕食者模型。

对于生态工程而言，它是一个由人参与的改造自然的工程，从而构成了一个复杂的生态、经济、资源系统，其生产周期比较长，一次失误，几十年甚至上百年也不容易弥补其损失。比如为掌握林业生态工程的质量，确定实施后的生态效益、社会效益和经济效益的长期动态变化规律，制定国家、地方更为合理的林业工程建设计划，保障林业资源的永续利用，生态环境的良性循环，生态效益、社会效益和经济效益的持续稳定，人们愈来愈感到应用传统的静态分析方法，即利用过去或现在若干时点上的状态，要对系统的未来做出动态的预测是十分困难的，已经得到的结果又有许多不足之处。如果将系统动力学方法引入林业系统，建立林业生态工程系统的动力学模型就可以弥补上述不足的。

第九章　城市生态学

城市生态学是生态学的重要内容，理解城市生态系统的组成、结构和功能以及它们之间的相互作用关系，是城市生态学的关键。城市生态学的应用十分广泛，包括城市生态平衡与调控、城市生态设计、城市生态规划及城市生态管理，对于城市资源的管理、保护及开发利用也起着越来越大的作用。现代城市生态学是一门新兴的、正在深入开拓和迅速发展中的学科。概括地说，城市生态学研究的重点主要集中在下列几个方面：城乡复合生态系统可持续能力建设的方法与案例；城镇人居环境的生态设计、生态规划方法；产业可持续发展的清洁生产技术和产业生态学方法；城市及开发区建设的生态影响分析及生态风险评价方法等(于志熙　1992)。

第一节　城市生态学的概念及其研究内容

一、城市生态学的概念

城市生态系统是城市居民与其周围环境相互作用形成的网络结构，也是人类在改造和适应自然环境的基础上建立起来的特殊的人工生态系统。从时空观来看，城市是人类生产和生活活动集中的较大场所和中心；从本质和功能来说，城市是经济实体、社会实体、科学文化实体和自然实体的有机统一。因此，城市生态系统又是一个社会-经济-自然复合生态系统。马世俊等于 1984 年将之称为 SENCE(social-economic-natural complex ecosystem)，认为城市的自然及物理组分是其赖以生存的基础；城市各部门的经济活动和代谢过程是城市生存发展的活力和命脉；而人的社会行为及文化观念则是城市演替与进化的动力泵(马世俊，王如松　1984)。

城市生态系统占有一定的环境地段，有其特有的生物组成要素和非生物组成要素，还包括人类和社会经济要素。这些要素通过物质-能量代谢、生物地球化学循环以及物质供应和废物处理系统，形成一个有内在联系的统一整体。

严格地讲，城市只是人口集中居住的地方，是当地自然环境的一部分，它本身并非一个完整的、自我稳定的生态系统。因为，一方面城市所需的物质和能量大都来自周围其他系统，其状况如何往往取决于外部条件。另一方面，城市也具有生态系统的某些特征，如组成城市的生物成分，除人类外，还有植物、动物和微生物，能够进行初级生产和次级生产，具有物质的循环和能量的流动，但这些作用都因人类的参与而发生或大或小的变化。此外，城市与其周围的生态系统存在着千丝万缕的联系。它们之间彼此相互影响，相互作用。因此，把城市作为一个生态系统，研究其物质能量的高效利用，社会、自然的协调发展，系统动态的自我调节，不仅有益于城市本身的发展、管理和规

划，也有利于处理和协调城市与周围地区的关系。基于以上的认识，我们认为城市生态学是以生态学理论为基础，应用生态学的方法研究以人为核心的城市生态系统的结构、功能、动态，以及系统组成成分间和系统与周围生态系统间相互作用的规律，并利用这些规律优化系统结构，调节系统关系，提高物质转化和能量利用效率以及改善环境质量，实现系统结构合理、功能高效和关系协调的一门综合性学科。

二、城市生态学的研究内容

（一）城市生态系统结构方面的研究

生态系统的结构是指系统内各组成部分的配比以及空间格局。城市生态系统是一个以人为中心的环境系统，其结构非常复杂，既包括自然环境，又包括人为环境，它涉及面很广，其结构研究可分为：

1) 城市化对环境的影响。诸如，城市的气候与大气污染、城市土壤与土壤污染、城市的水体与水污染、城市交通与交通污染、城市的土地利用、城市的噪声、城市的垃圾等。

2) 城市化对生物的影响以及生物的反应。诸如，城市植物区系和植被及其与人体健康，城市动物区系及其与人体健康，城市指示植物与生物监测等。

3) 城市化对人群的影响 诸如。人口动态与城市发展，城市人群的生态处境与身心健康等。

通过对各种结构成分的研究以揭示城市化过程与环境变化的相互关系，以及资源利用对城市环境的影响，这是城市生态学研究的基础。

（二）城市生态系统功能的研究

城市生态系统功能主要是指城市生产和生活功能。城市在生产和生活过程中要消耗大量的物质和能量，而它自身能够提供的只是很小一部分，大部分都要靠外部输入。城市中的物质代谢、能量流动和信息传递都有很大的特异性，揭示它们的作用特点和作用规律是解决城市问题的关键。这方面研究包括：城市食物网、城市物质生产和物质循环、城市能源及城市能量流动、城市信息类型及其传递方式与效率、城市环境容量等。

（三）城市生态系统的动态研究

生态系统的动态研究是指系统的发生、发展和演变。城市生态系统的动态研究包括城市形成、发展的历史过程，以及与此相应的自然环境和人文环境变化的动因分析。这项研究有助于认识城市生态系统的发展规律，可为老城市改造和新城市建设指明方向。

(四) 城市生态系统的系统生态学研究

在城市生态系统结构和功能研究的基础上，对城市生态系统进行模拟、评价、预测和优化。

(五) 城市的生态规划、生态建设和生态管理

根据城市生态学的理论对城市进行生态评价、生态规划、生态建设和生态管理。这些方面既是城市规划、城市建设和城市管理的一部分，又与它们有区别，并可作为它们的补充。

(六) 城市生态系统与周围农村生态系统间关系的研究

包括人口、物资、信息的交流以及相互影响等。此外，还可从维护区域生态平衡、合理利用自然资源的角度出发进行城市生态系统与区域大系统间关系，乃至与全球环境间关系的研究。

城市生态学研究的对象是一个人类在漫长的实践过程中，通过对自然环境的适应、加工、改造而建立起来的人工生态系统，研究目的是要实现城市生态系统的结构合理、功能高效和关系的协调，以提高城市生产和生活质量(康慕谊 1997)。

第二节　城市生态系统的组成结构及其特点

一、城市生态系统的组成

城市生态系统是一个以人为中心的自然、经济与社会复合的人工生态系统，因而其组成包括自然系统、经济系统与社会系统(图 9-1)。

自然系统包括城市居民赖以生存的基本物质环境，如太阳、空气、淡水、森林、气候、岩石、土壤、动物、植物、微生物、矿藏以及自然景观等。它以生物与环境的协同共生及环境对城市活动的支持、容纳、缓冲及净化为特征。经济系统涉及生产、分配、流通与消费的各个环节，包括工业、农业、交通、运输、贸易、金融、建筑、通讯、科技等。它以物资从分散向集中的高密度运转，能量从低质向高质的高强度集聚，信息从低序向高序的连续积累为特征。社会系统涉及城市居民及其物质生活与精神生活诸方面，它以高密度的人口和高强度的生活消费为特征，如居住、饮食、服务、供应、医疗、旅游以及人们的心理状态，还涉及文化、艺术、宗教、法律等上层建筑范畴。社会系统是人类在自身的活动中产生的，主要存在于人与人之间的关系上，存在于意识形态领域中。

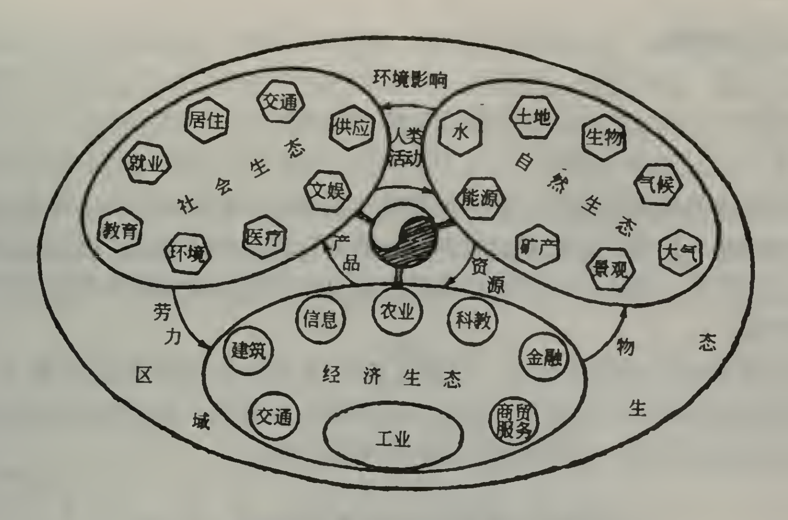


图 9-1　城市生态系统的组成与结构(王如松　1988)

二、城市生态系统的结构

城市生态系统的结构在很大程度上不同于自然生态系统。因为除了自然系统本身的结构外，还有以人类为主体的社会结构和经济结构。

(一) 空 间 结 构

城市由各类建筑群、街道、绿地等构成，形成一定的空间结构，这就是同心圆、辐射(扇形)、镶嵌三类结构。它们可能在不同的城市出现，也可能在同一城市的不同地点出现。城市空间结构往往取决于城市的地理条件、社会制度、经济状况、种族组成等因素。例如，社会经济规则引起了扇形结构的变化，家庭的变化导致了同心圆结构的变化，而种族的不同形成了多中心的镶嵌结构。又如依照自然条件(或依山或傍水)而发展起来的房屋建筑和城市基础设施决定了城市空间结构的外观。

(二) 社 会 结 构

包括人口、劳动力和智力结构。城市人口是城市的主体，其数量往往决定着城市的规模和等级。劳动力结构是指不同职业的劳动力所占的比例，它反映出城市的经济特点和主要职能。如工业城市产业工人多，商业城市商业人员多，文化城市科技和教学人员多。智力结构是指具有一定专业知识和一定技术水平的那部分劳动力，它反映出城市的文化水平和现代化程度，也是决定城市经济发展的重要条件。

(三) 经 济 结 构

由生产系统、消费系统、流通系统几部分组成。各部分的比例因城市不同而异，取

决于城市的性质和职能。

(四) 营 养 结 构

城市生态系统是以人类为中心成分的复合生态系统，系统中生产者绿色植物的量很少，主要消费者是人，而不是其他动物，分解者微生物亦少。因此，城市生态系统不能维持自给自足的状态，需要从外界供给物质和能量，从而形成不同于自然生态系统的倒三角形营养结构。

在城市生态系统的结构研究中，最能反映系统内部运动规律的因素有：城市人口、城市经济活动和城市土地利用。其中土地利用尤其重要，因为它是人类社会经济活动规模与水平的综合表现，是空间结构状况的实际反映。

三、城市生态系统的特点

城市生态系统是一个结构复杂、功能多样、巨大而开放的自然、经济与社会复合人工生态系统，与自然生态系统相比，城市生态系统具如下特点：

(一) 城市生态系统是以人为主体的生态系统

人类是城市生态系统中的生产者，城市的一切设施都是人创造的。人类用自己的汗水和智慧，把大自然改造得适合人类的心愿。人类的生命活动是生态系统中能流、物流和信息流的一部分，人类亦具有其自身的再生产过程。

人类又是城市生态系统中的主要消费者。动物在城市生态系统中以现存量计很少，且主要为一些伴人害虫或家养动物，体现着人类的影响。人类的生物物质现存量不仅大大超过系统内的动物，也大大超过系统内绿色植物的现存量。与绿色植物和其他动物相比，人类处在营养级倒金字塔的顶端。

人类是城市生态系统的主宰者，其主导作用不仅仅在于参与生态系统的上述各个过程，更重要的是人类为了自身的利益对城市生态系统进行着控制和管理，人类的经济活动对城市生态系统的发展起着重要的支配作用。

(二) 城市生态系统是容量大、流量大、密度高、运转快、高度开放的生态系统

由于城市生态系统的主要消费者是人，其所消费的食物量大大超过系统内绿色植物所能提供的数量。因此，城市生态系统所需求的大部分食物能量和物质，要依靠从其他生态系统(如农田、森林、草原、海洋等生态系统)人为地输入。同时，城市生态系统中的生产、建设、交通、运输等都需要能量和物质供应，这些也必须从外界输入，并通过加工、改造，如将煤、原油等转化为电力、煤气、蒸汽、焦炭、各种石油制

品等，将原材料转化为钢材、汽车、电视机、塑料、纺织品等，以满足人类的各种需要。其中能量在系统内通过人类生产和生活实现流通转化，逐级消耗，维持系统的功能稳定；而人类生产和生活所产生的产品和大量废弃物，大多不是在城市内部消化、消耗和分解，而必须输送到其他生态系统中去消化(图 9-2)。因此，构成城市生态系统的能流和物流，可概括为以下五个过程：开采、制造、运输、使用、废弃。这种与周围其他生态系统相比高速而大量的能流和物流交换，主要靠人类活动来协调，使之趋于相对平衡，从而最大限度地完善城市生活环境，满足居民的需要。

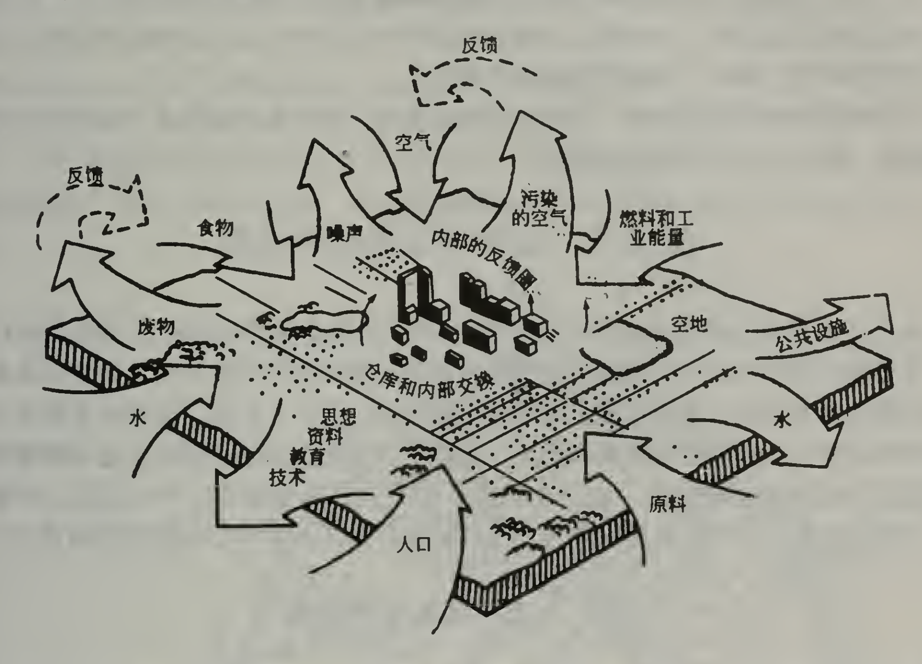


图 9-2　典型城市生态系统的输入与输出图解(康慕谊　1997)

正是由于城市生态系统的这种非独立性和对其他生态系统的依赖性，使城市生态系统显得特别脆弱、自我调节能力很小。

(三) 城市生态系统是人类自我驯化的系统

在城市生态系统中，人类一方面为自身创造了舒适的生活条件，满足自己在生存、享受和发展上的许多需要；另一方面又抑制了绿色植物和其他生物的生存与活动，污染了洁净的自然环境，反过来又影响人类的生存和发展。人类驯化了其他生物，把野生生物限制在一定范围内，同时把自己圈在人工化的城市里，使自己不断适应城市环境和生活方式，这就是人类自身驯化的过程。人类远离自己祖先生活的那种“野趣”的自然条件，在心理上和生理上均受到一定影响，一部分人还因此而罹患“文明病”，如肥胖症、神经衰弱、心血管病等。

（四）城市生态系统是多层次的复杂系统

仅以人为中心，即可将城市生态系统划分为三个层次的子系统：

1) 生物(人)-自然(环境)系统。只考虑人的生物性活动，是人与其生存环境的气候、地形、食物、淡水、生活废弃物等构成的子系统；

2) 工业-经济系统。只考虑人的经济(生产、消费)活动，由人与能源、原料、工业生产过程、交通运输、商品贸易、工业废弃物等构成的子系统；

3) 文化-社会系统。只考虑人的社会活动和文化生活，由人的社会组织、政治活动、文化、教育、康乐、服务等构成的子系统。

以上各层次的子系统内部，都有自己的能量流、物质流和信息流，而各层次之间又相互联系，构成一个不可分割的整体。

第三节　城市生态系统的功能

城市生态系统的功能与结构是相对统一的，结构是功能的基础，功能是结构的表现，是贯穿在城市生态系统网络中各种事物运动过程的具体状态表现。城市生态系统的基本功能就是城市生态系统在满足城市居民的生产、生活、游憩、交通以及服务等活动中所发挥的作用，具体表现为城市的生产功能、生活功能和还原功能，通过物质循环、能量流动和信息的传递功能，以“生态流”的方式，将城市的生产与生活、资源与环境、时间与空间、结构与功能以及与外部环境的关系以人为中心而联系起来(图 9-3)。

一、生态系统的生产功能

城市生态系统的生产功能是指城市生态系统具有利用区域内外自然的与其他各种资源生产出物质的和精神的产品的能力。有目的地组织生产和追求最大的产量是城市生态系统有别于自然生态系统的显著标志之一，它具有以下特点：① 空间利用率高，能流、物流高强度密集，系统输入、输出量大；② 主要消耗不可再生性资源，且利用率低；③ “食物链”呈线状而不是网状；④ 系统对外界的依赖性大。城市生态系统的生产可以分为生物性生产与非生物性生产两大类。

（一）生物性生产

城市的生物性初级生产主要是由城市内所有绿色植物包括林地绿地(森林、草地)、果园、农田、蔬菜地、苗圃等以及藻类和有自养能力的光合细菌完成的。它们的共同特点是具有叶绿素或其他光合色素，能吸收并利用太阳光能，将水和二氧化碳合成为有机物并放出氧气。其反应式如下：

$$6CO_2+12H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6+6H_2O+6O_2\uparrow$$

城市中及城市郊区的绿色植物生产出城市居民生活所必需的粮食、蔬菜、水果以及其他农副产品，但由于城市生产中往往是第二、第三产业为主，第一产业所占比例很小，因此，城市本身生物性生产的食物不能满足居民生活的需要，而必须依赖异地生产的食物供养。

虽然城市中绿色植物进行的初级生产不占主导地位，但其生产过程中所具有的吸收二氧化碳、释放氧气等功能对人类是十分有价值的，对于维护城市生态平衡具有十分重要的作用。印度达斯教授曾计算过一株树龄为 50 年的树木每年至少产生氧气 1t，每吨以 625 美元计，则 50 年生产 50t 氧气的价值为 31 250 美元，同时减轻污染的价值达 62 500 美元；50 年中该树木防止水土流失及增肥的价值为 31 250 美元，调节径流保持水土的价值为 37 500 美元；50 年中为牲畜遮风挡雨、供鸟类做巢栖息的价值为 31 250 美元，同时制造出蛋白质的价值为 2500 美元，共计约 196 250 美元。因此，搞好城市的绿地建设，扩大城市的森林、草地等绿地面积，尽力保留城市郊区的农田是十分必要的。

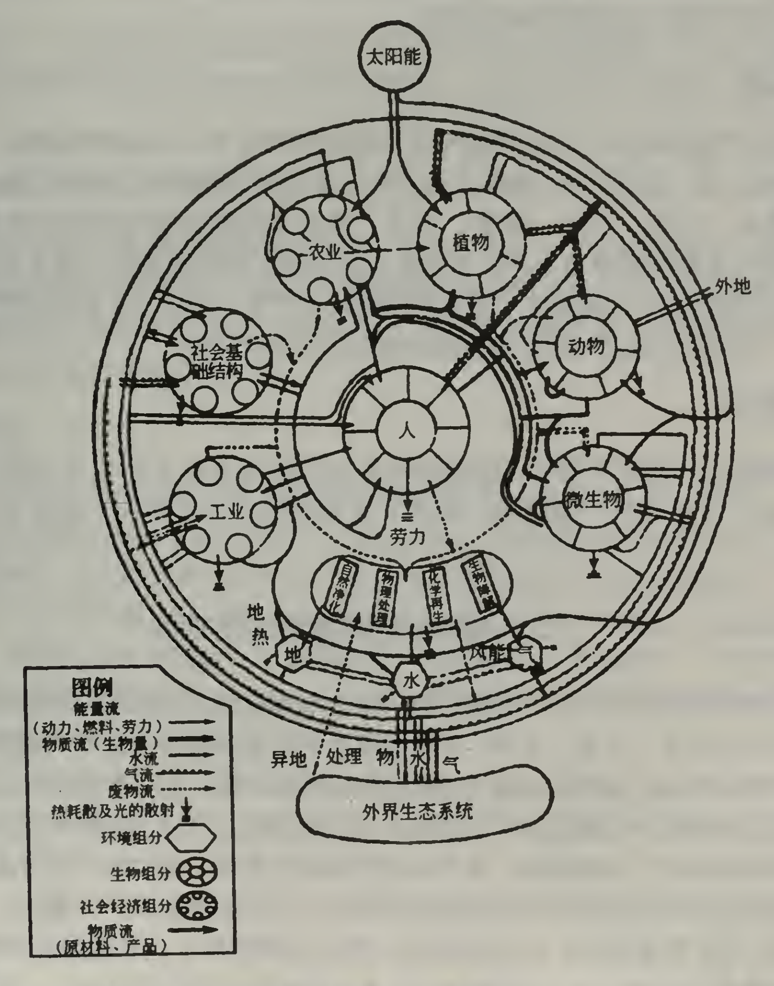


图 9-3 城市生态系统的物质循环与能量流动(王如松 1988)

城市生态系统的生物性初级生产具有人工化程度高、生产效率高、品种单调的特点。与自然生态系统相比，后者是自然生长的，处于“自生自灭”的状态；而前者却处于高度的人工干预状态之下，虽然生产效率大大高于后者，但就稳定性而言，远远不及后者。城市生态系统的生物性次级生产是城市中以人为主的异养生物对初级生产物质的利用和再生产过程，一切过程都在人为控制状态下，营养结构简单而直接；在自然生态系统中由初级消费者到次级消费者之间能量的转化往往需要多个营养级才能完成。从城市行政所辖范围看，城市生态系统的生物初级生产量并不能满足城市生态系统的生物次级生产的需要量。因此，城市生态系统所需要的生物次级生产物质有相当部分需要从城市外部调运进城市。

（二）非生物性生产

城市生态系统的非生物性生产包括物质性的和非物质性的两个方面，这也是城市生态系统不同于自然生态系统的明显特征。

1. 物质生产

物质生产是指满足人们的物质生活所需的各类有形产品及服务设施。包括：① 各类工业产品；② 设施产品，指各类为城市正常运行所需的城市基础设施；③ 服务性产品，指服务、金融、医疗、教育、贸易、娱乐等各项活动得以进行所需要的各项设施。城市生态系统的物质生产产品不仅为城市地区的居民服务，更主要的也为城市地区以外的人群服务。因此城市生态系统的物质生产量十分巨大，其所耗资源与能量也十分惊人，对城市区域及外部区域自然环境的压力不容忽视。

2. 非物质生产

非物质生产是指为满足人们的精神生活所需的各种文化艺术产品。如小说、绘画、音乐、电影电视、戏剧等，满足了人类的精神文化需求，陶冶了人们的精神情操。

二、城市生态系统的生活功能

一个城市的生活功能是否正常决定了这个城市的活力与魅力，也影响到城市可持续发展的潜力与水平。生存、发展、不断提高生活水平是人类社会的本能需求。随着社会的进步和时代变迁，城市居民的生活需求也在逐渐演变：从基本的物质、能量和空间需求，到更丰富的精神、信息和时间需求；从崇尚高楼大厦、立交桥到返朴归真、追求大自然的田园风光和“青山不老、绿水长流”的原始意境。现代城市的生活方式正在经历着一场从人工环境向自然环境回复的生态觉醒。① 物质需求：从追求人工产品回归到自然产品；② 能量需求：从开发石油、煤、天然气等矿物能到提倡利用风能、太阳能、潮汐能等自然能；③ 空间需求：从狭小的城市空间到城郊结合、城乡融合的更大区域，从追求室内建筑空间到大自然中以水系、山系、绿系的生态空间；④ 信息需

求：从嘈杂的信息污染、视觉污染到有序多样、精巧高效的信息高速公路、Internet。

总之，城市的生活职能应不断满足居民日益增长的这些需求，过去人们对城市的生活功能重视不够，过分强调了城市的生产功能，因而造成了不少的环境问题。

三、城市生态系统的还原功能

城市生态系统的还原功能即净化还原功能，对于维持城市生态平衡十分重要。高度人工化的城市生态系统是建立在破坏原自然生态系统平衡的基础上的，要使城市和郊外环境协调一致，保持区域自然生态的平衡和稳定，一方面城市必须具备消除和缓冲自身发展给自然造成不良影响的能力；另一方面在自然界发生不良变化时，又能尽快使其恢复到原状。这是由城市生态系统的还原功能来完成的。

（一）自然净化功能

在正常情况下，受污染的环境经过环境中自然发生的一系列物理、化学、生物和生化过程，在一定的时间范围内都能自动恢复到原状，称为自然净化功能。包括以下类型。

1. 水体自净功能

污染物质的浓度在水体中自然降解的现象，称为水体自净。其原理在于：天然水的稀释作用，水体中悬浮物的沉淀以及氧化和凝聚等化学过程，微生物的分解作用。水体的自净能力是有限的，如废水中所含污染物过多，超过其环境容量，则将严重影响水体的自净作用，造成严重的环境污染。

2. 大气扩散功能

大气中的污染物，经过自然条件下的物理和化学作用，空间的扩散、稀释，其浓度大幅度下降；或受重力作用，较重粒子沉降于地面；或在雨水的洗涤作用下返回地面；或被分解破坏。大气的这种自净作用，是自然环境调节的一种重要机能。

污染物在大气中的扩散、稀释取决于大气的运动状态即风向和湍流，它们是污染物在大气中扩散、稀释的最直接因素。一般情况下，风速越大，湍流越强，扩散稀释的速度越快，污染物浓度就越低。此外，雨、云、雾、太阳辐射、大气稳定度以及特殊的逆温层等气象条件都对大气扩散功能有一定的影响。

1959 年 12 月 5~9 日，英国全境几乎都有大雾，并有逆温，当时在伦敦 60~150m 的低空，出现逆温层，风速很小，甚至无风，天气寒冷，住户与工厂排放烟尘较多，向上扩散不出去。12 月 7 日飘尘浓度为 4.46mg/m^3，二氧化硫浓度为 3.82mg/m^3，12 月 5~9 日死亡达 2484 人。天气背景是影响大气污染不可忽视的因子。此外，地形、地貌、海陆位置、建筑和构筑物格局等地理因素也都对大气扩散产生间接影响。

3. 城市绿地净化功能

城市绿地滞尘、吸收有毒有害气体、向大气补充氧气是一种典型的自净过程，当空气中的污染物数量超过其自净能力时，即出现空气污染。

4. 土地处理能力

土壤具有肥力、营养条件、环境条件和同化代谢外界输入物质的能力。进入土壤中的污染物质，经过物理、化学、微生物等过程的反复作用及土壤植被的影响，除重金属和放射性污染外，多数有机和无机物质在一定程度上经过足够的时间都可迁移转化。但当土壤中的“三废”物质数量超过土壤的迁移转化能力时，就破坏了土壤的原有平衡，发生土壤污染。

（二）人工调节功能

城市的自然净化功能是脆弱而有限的，多数还原功能要靠人类通过以下途径去创造和调节：① 城市绿地系统规划与建设；② 城市“三废”防治与控制；③ 工业合理布局、设备更新改造、规划与管理的手段等。

狭义的环境保护是对城市的污水、废气、固体废弃物、噪声等采取人工防范措施。一是改革工艺技术和流程，疏通物质、能量流通渠道，提高资源利用率；二是通过消烟除尘、污水处理、垃圾处理等措施，加快废物的分解还原过程；三是采取一定的法律手段和保护措施，防止污染的扩散和对人体的直接危害。

以上三种功能是相辅相成、相得益彰的。

四、城市生态系统的生态流

城市生态系统的功能是由其中互相联系、互相作用、互相促进的物质流、能量流、人口流、资金流和信息流来完成的，我们把这些称为生态流，正是这些生态流以物质循环、能量流动和信息传递的运动方式和过程，实现了城市生态系统的生产、生活和还原功能。弄清了这些生态流的动力学机制和调控方法，也就能基本掌握城市生态系统中错综复杂的生态关系。

（一）城市生态系统的物质流

城市生态系统的物质流可以分为自然物质流、人工产品流和废物流等。借助于这些物质流的输入、输出、迁移和转化，城市生态系统不断地进行着新陈代谢和与外界的物质交换，保持着系统的活力。

自然物质流是由自然力推动的生态流，又称为自然资源流，主要指空气、水体的流动等。自然流具有数量巨大、状态不稳定的特征，其流动的速度和强度，直接影响到城市的生产、生活和还原作用，从而对城市的生态环境质量形成巨大的影响。

城市的空气通过人体及动植物的呼吸作用、微生物的氧化分解作用和城市的生产燃烧作用，部分氧气被消耗，其余的连同二氧化碳和其他各种污染源产生的废气及颗粒物一起排入城市大气中，并被输送到城市外部，新鲜空气又以风的形式自然吹入城市，进行循环。从生态学角度看，一个城市氧气的消耗是城市活动的一个显著标志，如北京的空气流中，氧气输入量为 $65\,580\times10^4$t，输出量为 $65\,542\times10^4$t，氧气产生量为 3.34×10^4t，消费量为 41.5×10^4t，消费量大大高于产生量；而二氧化碳输入量为 130×10^4t，输出量为 182×10^4t，产生 57×10^4t，消费 5×10^4t，消费量远远小于产生量，这个情况反映了北京的绿地生物量太小，以至 O_2-CO_2 的平衡被严重破坏。此外，一个城市氧气的消耗量也反映了城市规模的大小，如王如松(1988)的资料表明，京、津等大城市的年耗氧量就比廊坊地区的耗氧量大 10 倍以上，北京为 5196 万 t，天津为 3682 万 t，而廊坊则为 363 万 t。水是城市里流量最大，速度最快的物质，既是食物和原料，又是传递物质和能量的载体，是城市生产、生活和还原功能作用中必不可少的物质。城市内水循环的模式有水渠、上下水道等人工控制系统中的循环，也有雨水的地面径流等自然循环，两者互相结合，关系复杂。

随着现代城市生产和生活水平的提高，人们对水的需求愈来愈大。为了维持生存，从生理需要看，每人每天至少需要 2~2.5L 水，一般生活需要 5L 水，再加上洗洁、卫生等方面的用途，至少需要 40~50L 水。发达国家城市居民每人每天平均供水量为 300~500L，发展中国家为 100~300L。水平最高的为芝加哥(824L)，其次为莫斯科和华盛顿(700L)，再次为纽约、大阪(600L)和巴黎(450L)；我国 1996 年城市人均日用水量为 208L，其中上海 287L，北京 269L，天津 128L。我国是一个水资源紧缺的国家，人均水资源只有美国的 1/4、前苏联和加拿大的 1/7，因此，提高城市水资源的循环复用率十分重要，日本工业用水的复用率 1979 年时即已达 73.1%。

人工产品流指为保证城市功能正常发挥所涉及的各种物质资料在城市中的各种状态及作用的集合，在物质流类型中最为复杂，因为它不仅是简单的物质输入与输出，其中还经过了复杂的生产、交换、分配、消费、累计及排放出废弃物的环节，形态和功能都有了较大的变化。

不同规模、不同性质的城市，其物质的输入和输出的规模、性质和代谢水平也不同，因此，一个城市的物质输入和输出的数字也反映了这个城市的生态经济态势和发展状态，如崔学增等(1983)从我国唐山市 1981~1983 年物质流动的估算中得出，平均每年向系统内输入的物质大约为 3.45×10^8t，输出的物质大约为 3.43×10^8t。

综上所述，城市生态系统的物质循环具有以下特点：

1. 城市生态系统所需物质对外界有依赖性

绝大多数城市系统本身都缺乏维持城市的各种物质，皆需从城市外部输入城市生产、生活所需的各类物质，离开了外部输入的物质，城市将立即陷入困境。

2. 城市生态系统物质既有输入，又有输出

城市生态系统在输入大量物质满足城市生产和生活的需求的同时，也输出大量的物质(不仅仅是“废物”)。如上海 1992 年生产成品钢材 918×10^4t，上海自身仅消费

343×10^4t，有近 600×10^4t 钢材外运。

3. 生产性物质远远大于生活性物质

这是由于城市最基本的特点是经济集聚(生产集聚)所决定的。如唐山市 1981~1983 年输入城市的农副产品为 69.37×10^4t，而同期输入的原料产品为 1080×10^4t，前者仅占后者的 8%左右。

4. 城市生态系统的物质流缺乏循环

自然生态系统中经过分解者的作用可使全部物质反复利用、反复循环。但城市生态系统中分解者的数量很少，作用微乎其微，再加上物质循环中产生的废物数量巨大，故城市生态系统中废物难以分解和还原，物质被循环利用的比例是相当小的。

5. 物质循环在人为控制状态下进行

与自然生态系统的物质循环主要在自然状态下进行不同，城市生态系统的物质循环皆在人为状态下进行。人们为了增加产品种类，提高生产效率，满足物质享受，使得城市生态系统的物质循环从物质输入到物质处理、利用等过程皆由人为控制。这表明城市生态系统的物质循环受强烈的人为因素的影响。

6. 物质循环过程中产生大量废物

由于科技水平的限制以及人们思想的局限，城市生态系统物质利用的不彻底导致了物质循环的不彻底，物质循环的不彻底又导致了物质循环过程中产生大量废物。如据有关资料表明，唐山市 1981~1983 年输出物质中共有废渣、废水、废气、产品四类，前三类皆为废物，有用的“产品”仅占全部输出物质的 6%左右。这是由于物质在循环过程中，城市对物质的利用因生产技术的限制并不充分，其后果之一即是排放大量废弃物，造成环境污染，降低城市环境质量。

(二) 城市生态系统的能量流

1. 概念

能量流即能量流动，是指能产生各种能量的自然资源和物质，如热能、光能、太阳能、机械能、化学能、生物能、核能等在生态系统中的流动情况，是生态系统中生物与环境之间、生物与生物之间能量的传递与转化过程。城市生态系统内的能量收支如图 9-4 所示，其基本特点是：① 能量沿着生产者、消费者、分解者这三大功能类群顺序流动，流动的主要渠道是食物链和食物网；② 能量流动是线性的，不是网状的，也不可逆转；③ 能量流动同样遵守热力学第一定律和第二定律。生态系统中能量是沿着生产者和各级消费者的顺序逐级减少的。林德曼“百分之十定律”认为，在生态系统中，某营养级对上一个营养级位的能量利用的效率只有 1/10，近年来有研究发现，这个比值高的可达到 30%，低的只有 1%左右。城市生态系统的能量流动是指

能源在满足城市生产、生活、游憩、交通功能的过程中，在城市生态系统内外的传递、流通和耗散的过程。

2. 类型与结构

城市的能源按其对环境的影响程度，可以分为清洁型和污染型，前者如风能、太阳能、水能等，后者如煤炭、柴油等；按其形式可分为一次能源和二次能源；按能否更新可以分为可更新能源和不可更新能源；按其使用情况可分为常规能源和新型能源。

能量流动的效率与城市的能源结构、生产结构、消费结构、城市所在地区、城市经济结构等特征密切相关。据有关资料，改革开放以来，我国城市能源中，以煤炭为主的能源消耗构成几乎没有发生变化。城市能源的消费结构与城市的环境质量密切相关， 这是因为燃料(能源)的有效利用系数只有 1/3，其余 2/3 作为废物排放到环境中。据统计，80%的环境污染来自燃料的燃烧过程。

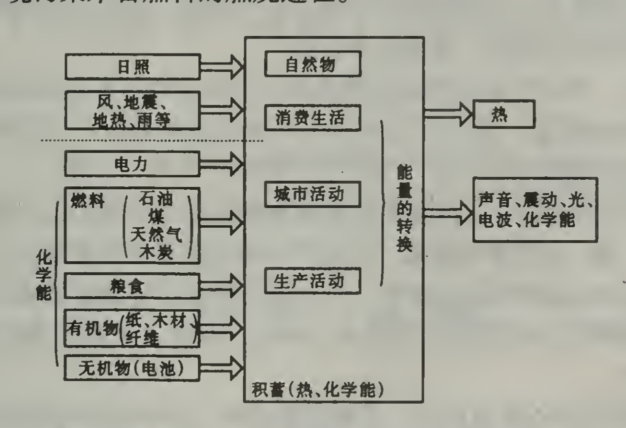


图 9-4 城市生态系统的能量收支(王如松 1988)

3. 流动过程与特点

(1) 流动过程

城市生态系统的能量形式，主要包括煤、石油、天然气、油页岩、油沙等；还有太阳能、生物能(生物转化了的太阳能)、风能、水力、潮汐能、波浪能、海洋温差能、核能(聚、裂变能)和地热能等。原生能源中有少数可以直接利用，如煤、天然气等，但大多数都需要经加工转化后才能使用。

次生能源为经过加工或转化，便于输送、储存和使用的能量形式。其形式较单一， 如电力、柴油、液化气等。有用能源指使用者为了达到使用目的，将次生能源转化为特殊的使用形式，如马达的机械能、炉子的热能、灯的光能等。最终能源则是能量使用的最终目的，它是存在于产品中或投入到所创造的环境中的能量形式。如抽水机把机械能转变为水的势能；炼钢炉把热能转变为钢材内部的分子能；日光灯把光能投入到所创造的明亮中，最终变为热量耗散掉等。城市生态系统中原生能源一般皆需从城市外部调入，其运输量十分惊人。如上海 1992 年煤炭消费总量达 2874×10^4t，占上海总货运量 $20\,572\times10^4$t 的近 1/10。 原生能源转化为次生能源的过程(如煤、石油转化为电

力、柴油)，是最容易产生污染的环节。如我国最大城市上海的工业(含电力业)耗煤量每年以 10%的速度递增，燃煤产生的二氧化硫也以年均 7.7%的速度递增。两者之间的对应关系十分明显。因此，应尽量选用清洁的原生能源，如天然气、核能等。因天然气是一种不含硫、燃烧释放二氧化碳只有煤一半的清净燃料，而核能更是一种“清净能源”。此外，提高次生能源向有用能源、最终能源传输、流动过程中的传输率，降低损耗，也是减少城市环境污染的途径之一。

(2) 能量流动的特点

① 在能量使用上，自然生态系统和城市生态系统的显著不同之处在于，前者的能量流动类型主要集中于系统内各生物物种间所进行的动态过程，反映在生物的新陈代谢过程中；而后者由于技术发展，大量的是非生物之间能量的变换和流转，反映在人力所制造的各种机械设备的运行过程之中。这种非生物性能量决非在城市这一相对“狭隘”的自然环境中所能满足的。随着城市的发展，它的能量、物资供应地区越来越大，从城市所在的邻近地区到整个国家，直至世界各地。

②传递方式上，城市生态系统的能量流动方式要比自然生态系统多。自然生态系统主要通过食物网传输能量，而城市生态系统可通过农业部门、采掘部门、能源生产部门、运输部门等传输能量。

③ 在能量流运行机制上，自然生态系统能量流动是自然的，而城市生态系统能量流动以人工为主，如一次能源转换成二次能源、有用能源等皆依靠人工。

④ 在能量生产和消费活动过程中，有一部分能量以三废形式排入环境，使城市遭受污染。如我国每燃烧 1t 煤排放二氧化硫 4.9kg，烟尘 1~45kg，氧化物 3.6~9.2kg，一氧化碳 0.2~22.7kg。

⑤ 能量流在流动中不断有损耗，不能构成循环，具有明显的单向性。

⑥ 除部分能量是由辐射传输外(热损耗)，其余的能量都是由各类物质携带。

(三) 城市生态系统的人口流

人口流也是一种特殊的物质流，包括时间上和空间上的变化，前者体现在城市人口的自然增长和机械增长上；后者体现在城市内部的人口流动和城市与相邻系统之间的人口流动上。人口流对城市生态系统各个方面具有深刻的影响。人口流的流动强度及空间密度反映了城市人类对其所居自然环境的影响力及作用力大小，与城市生态系统环境质量密切相关。人口流的反映形式之一静止形式，即人口密度与环境污染和资源破坏损失具有一定的对应关系，可用人口密度约束系数表示。人口密度约束系数指不同区域范围内环境污染和资源破坏损失的变化率与相应的人口密度变化率之比(人口密度为单位面积上的人口数)。它可为调控人口发展和合理分布，制定与环境保护相适应的人口政策，以及适应不同人口密度区域的环境政策和标准提供依据。

劳力流是特殊的人口流。劳力流包括劳动力在时间上的变化，即由于就业、退休等导致劳力数量的变动，以及劳力在空间上的变化，即劳力在各部门分配情况的变化。智力流则是特殊的劳力流。智力的开发过程(入学、就读、毕业、升学)是智力在时间上的

变化，反映着城市智力结构的改变过程；而智力在空间上的变化则反映智力(人才)在不同部门中的改变。

人口流可分为常住人口流和流动人口流两类。

1. 常住人口流

与城市常住人口流动的有关因素一般包括：① 人口的出生率和死亡率，其受社会制度、人口政策、人口的年龄结构、婚姻状况、生活水平等的影响。② 人口的迁入与迁出，其与城市发展水平密切相关。③ 人口的市内流动，据有关部门调查，1981 年上海市每人每天出行 2.87 次，天津市 2.44 次，徐州市 2.26 次。据日本 27 个城市的调查，每人每天出行为 2.39~3.06 次，美国旧金山市为 2.8 次。我国城市常住人口的出行以劳动(工作与学习)为主，社交比重不大。由于我国城市公共交通目前不够发达，一些大城市公交车辆运行不力，乘车舒适度下降，我国大城市行人交通与公交客运量之比大约为 6∶4 或 7∶3。城市规模不同，城市常住人口最大出行时间与交通出行方式也不同(表 9-1)。

表 9-1　城市人口规模与居民最大出行时间的关系

城市人口 /万	>100	100~50	50~20	20~5	<5
最大出行时间 /分	60	60~45	40~30	30	<30
出行方式	地铁、公交、自行车	公交、自行车	公交、自行车	公交、自行车、步行	自行车、步行

2. 流动人口

在人口流中，不可忽视的一部分是流动人口，即那些旅游、出差、探亲、过境、赶集的人口。据统计，华盛顿每年的旅游人次达 4000 万，伦敦达 700 万，东京达 600 万，新加坡达 560 万，北京每年的国外旅游人次为 200 万。国内旅游人次较难统计，但以 1995 年对外客运量 1.7 亿人次折算，至少超过 4000 万人次。上海流动人口超过 500 万，深圳流动人口超过 300 万。我国一些小城镇，年节前赶集的人口可达 10 万，甚至超过了城镇的常住人口数。 据有关资料，旅游人口所消耗的物质和能量一般都超过了城市常住人口的水平。如对桂林市调查，外国游客比城市居民排放的生活污水多 6.8 倍、生活垃圾多 9.8 倍、废气多 8 倍；国内游客比本市居民排放的生活污水多 2 倍、生活垃圾多 2.5 倍、废气多 2 倍。具体数据为，国外游客(按平均游 2.2 天计)排放生活污水 4t，垃圾 14.3kg，二氧化硫 3kg，烟尘 0.72kg。国内游客 (平均按 3 天计)排放生活污水 1.35t，生活垃圾 3.6 kg，二氧化硫 0.9 kg，烟尘 0.23 kg。

城市人口结构的时间变化，包括常住人口流、劳力流和智力流的变化。常住人口流包括出生、死亡、迁入、迁出，即自然增长和机械增长两部分。我国城市人口的自然增长是可控的，城市计划生育工作做得较好，已基本实现一胎化；机械增长从形式上说也是可控的，即由城市户口所控制，但随着城市的改革开放，通过各种渠道进入城市的暂住人口越来越成为不可控因子。

(四) 城市生态系统的信息流

城市信息流是通过文字、语言、音像、思维及感觉来传播的(自觉的或不自觉的，系统的或零星的)，包括听(会议、谈话、广播、录音、电话等)、读(报刊、杂志、书籍、档案等)、看(电视、录像、参观等)等被动式的传播途径及想(思考、推理、假设、联想等)、问(问别人、问自己、问计算机等)、写(笔记、文章、文件、著作等)等主动式的传播途径。城市信息流包括经营信息(生产信息、流通信息)、生活信息 (物质生活及精神生活信息)、科技信息(科技情报、期刊等信息)和社会信息(政治、军事信息)等有商品价值的功能性信息和城市各条块间的纵向控制信息(上下级关系、家庭关系等)、横向反馈信息(部门之间、同事之间、亲戚之间以及与城市外部环境之间关系)等结构性信息。

人是城市信息流的载体，每个城市居民既是信息的源，也是信息的汇，还是信息的加工厂。而每一个家庭、社会团体、企事业单位和学校，则是按照一定信息规则组织起来的信息加工集团，各自通过汲取、加工和传播某些专门信息来维持自身的正常运转和为社会其他部门服务。几千年来，城市消耗了数不清的物质能量，留下的只有各行各业与环境斗争的丰富信息。人类社会的每一项重大变革，都是社会性技术或信息取得重大突破的结果。当今世界正处于从工业化社会向信息社会过渡的时代，这是一个知识爆炸的时代。如科技信息，目前每年以 20%的速度增长，每 4 年就增加 1 倍。如此庞杂的信息，若处理得当，可以增加城市生态系统的有序程度；若处理不当，失去控制或无组织的信息就不再成为资源而成为信息污染。

第四节　城市生态系统的平衡与调控

城市生态系统的平衡，是指城市这一自然-社会-经济复合生态系统在动态发展过程中，保持自身相对稳定有序的一种状态。其表现为城市中人类与自然环境间相互协调， 城市的各个组成部分结构合理，系统的输入与输出均衡，城市的功能得到正常发挥，城市经济的各个部门有计划按比例发展，城市社会安定，人民安居乐业。从定义出发， 可以看出这种平衡是在人类有意识的调控下才能达到的一种动态平衡。

一、城市生态系统平衡的理论依据

(一) 耗散结构理论和协同学理论

1. 耗散结构理论

耗散结构是指系统在远离平衡条件的状态下，通过耗用能量而可能维持的一种稳定有序的结构。热力学第二定律指出，在任何一个封闭的孤立系统中，均存在着不可逆的过程，这一过程最终将导致热力学上的平衡状态，即系统中物质与能量的均一分布。比利时物理学家Progogine于1969年创立的耗散结构理论认为，

在远离热力学平衡状态下，一个各子系统之间具有非线性关系的开放系统可以通过与其环境之间进行能量和物质的交换，不断引进负熵流，从而产生并维持系统的结构和功能处于有序状态。

2. 协同学理论

德国物理学家Haken在1976年研究激光时发现，当外界提供给激光的能量不够大时，光子是混乱无序的，各光子的位相、偏振方向是独立的；当外界供给的能量达到和超过一定值之后，各光子就具有相同的方向、频率和偏振方向，产生亮度和穿透力极强的激光。哈肯认为，客观世界的物质系统是由若干子系统所组成的，各子系统之间存在着某种关联，当子系统之间的关联足以束缚子系统的状态，使系统总体在宏观上显示出一定结构时，子系统之间便形成了协同，协同导致有序。这便是协同学理论。

（二）城市是具耗散结构的系统

城市生态系统的本质目标是越来越有序，在高效、和谐、低耗的基础上为人们创造优良的经济环境、社会环境和生态环境，以满足人们日益增长的更高标准生活质量的要求。

城市生态系统满足耗散结构的三个条件，即：① 开放系统；② 远离热力学的平衡状态；③ 各子系统之间具有非线性关系。

城市生态系统的开放性表现在三个方面：

第一，城市的社会经济系统和自然系统之间的交流。城市中人类的各种活动都离不开对环境资源的开发利用，自然资源的丰富度和可提供性是决定区域经济发展的最终限制，也是城市发展的限制因素。与此同时，城市还要向自然环境排放大量的废物。如果没有与自然环境的这种交换，城市便不可能生存。这种交换提示人们，城市的发展要符合环境容量的要求，注重生态系统的良性循环。

第二，城市内部各子系统之间的交流。城市内部各子系统之间的交流非常频繁。就经济活动而言，要使各个环节协调发展，使系统总体显示出有序性，需要不断地投入资金、设备、技术、劳力和原料，生产出的产品流向四面八方，否则经济就不可能维持和发展。

第三，城市与系统外部的交流。在当今商品经济、市场经济占统治地位的时代，城市只有在对外开放的过程中，与国内国外的其他城市不间断地进行物质、能量、资金、人才、信息的交流，同时向周围广大乡村地区推销产品与技术，排放“三废”，维持城市的新陈代谢，才能使城市保持稳定有序，生机勃勃地发展。

城市具有自己的结构和功能，系统中各组分之间能量和物质的分配不均匀是显而易见的，因而城市是一个远离热力学平衡状态的系统。

城市的各子系统之间具有错综复杂的关系，由于存在社会职能分工的不同，地域空间分布的不同，所属关系和管理体制的不同，各行业、各部门的活动规律也不同，因而

其间的关系是互相关联、互相制约、互相推动的非线性关系，而不是简单的因果关系或依赖关系。它们之间既存在正反馈的倍增关系，也存在负反馈的饱和效应。

因此，城市生态系统是具有典型耗散结构的自然-社会-经济复合生态系统。同时，城市生态系统各子系统之间存在的联系完全足以使系统的总体在宏观上构成协同，从而导致有序。

可见，系统的平衡即指系统内部结构和功能的稳定有序状态。这种平衡(稳态)是以外界不断供给系统能量和物质为前提的，而整个系统的正常、稳定、协调运作则依赖于建立一个卓有成效的城市管理决策、执行、监督、信息反馈工作体系。

二、城市生态系统平衡的标志

(一) 城市规模与资源和环境之间的关系

自然资源是城市存在和发展的基本条件，也是城市生态系统的重要组成部分。各类自然资源中，对城市建设和发展影响最大的是土地和淡水两项资源。

1. 土地资源

任何一座城市都离不开土地，任何一座城市都占有并建立在一定面积的土地之上。一般情况下，不同等级的城市占地面积不同，其次同一等级不同功能的城市占地也不一样。我国大城市与世界其他各国大城市相比，城市人均用地面积偏小(表 9-2)。在我国不同规模的城市中，大城市的人均用地面积又比小城市的小(表 9-3)。考虑到我国人口众多的特点，大城市按 1 万人/km^2 或 1 人/100m^2 的标准来规划，比较实际，也比较合理。

表 9-2　世界几个主要城市建成区的人口密度

	东京	北京	莫斯科	伦敦	巴黎	纽约
人口密度(万人/km^2)	1.42	1.25	1.08	0.92	0.83	0.88

表 9-3　我国不同规模城市人均占地情况

	特大城市	大、中城市	小城市
人均占地(m^2/人)	60	90	120

我国城市发展的基本方针是：控制大城市规模，合理发展中等城市，积极发展小城市。大城市拥有雄厚的物质条件和技术优势，专业门类齐全，协作条件好，并具有科学文化发达，交通便利等优势，因此经济效益较高。但是，城市的这种经济高效益并不总是与城市的规模成正比。城市规模过大，将会受到供水、能源、交通、环境等许多因素的限制。当规模超过一定限度时，就会运转不灵、效率下降。另外，单纯从经济效益出发考虑城市规模的观点已经过时，高的经济效益与良好的生态环境质量相统一的思想，已成为人们的新观点。城市规模的控制，主要是人口和土地利用规模的控制，其

目的是要促进城市建设的合理化，改变不合理的布局与结构，促进中小城市的发展等，要使大城市本身节制外延，有利于其内涵式发展。

从城市生态学的观点考虑，按照目前的经济和技术发展水平，我国城市的最佳规模以不超过 50 万人口为宜，占地约 $50km^2$，城市变距为 7km，职工上下班骑自行车最多只需要半个多小时，少量的公共交通工具就够周转了。人口再增加，势必占地面积过大， 不仅交通网必须加密，污染问题也会变得严重。反之，如果城市面积过小，公共设施不易完善，企业之间难以协作，投资建设的经济效益比较低，城市本身的发展亦受到限制。

城市土地作为各项工程建设的基础，对其质量一般有以下几点要求：① 地形较平坦，通常坡度应小于 10°；② 土地具有一定的承载力，通常不小于 $1000g/cm^2$ 或 $100kg/m^2$；③ 不易受洪水淹没，排水较畅通，地下水位应大于 1m。

2. 淡水资源

淡水是城市居民生活和城市生产不可缺少的重要资源，水既是生活必需品，又是原材料，还是传递物质和能量的载体。如洗涤用水是污染物的载体，发电和冶金用冷却水是余热(能量)的载体。每发 1000kW·h 电、炼 1t 钢、造 1t 纸，大约都需要 200t 水。一座百万人口的城市，仅就生活用水而言，若按人均用水 300L/d 计算，100 万人每年需要至少 1×10^8t 水。而我国大城市人均用水明显低于世界发达国家(表 9-4)。

表 9-4　世界几个主要城市的居民生活用水量

	北京	伦敦	巴黎	东京	莫斯科
人均用水量[L/(人·d)]	150	286	320	341	440

我国是水资源并不丰富的国家，淡水资源的人均拥有量仅为世界的四分之一。北方城市缺水是普遍现象，引水工程耗资巨大，如引滦济津，投资 8×10^8 元，加上潘家口和大汀水库的投资，总计不下 1.5×10^9 元，调水 1×10^9t。许多北方和沿海城市，水源不足已成为限制城市发展的重要因素。为此，在城市规划、建设和管理过程中，必须周密考虑城市人口与淡水资源之间的平衡，合理分配生产和生活用水，并要注意节约用水。

3. 能源

城市不仅人口集中，而且工业集中，因此耗能很大。我国城市中的一次性能源主要是煤，而且这一状况还将持续相当长的时间。其中能源的最大用户是工业，占 65%，交通和民用耗能的比重与发达国家相比很小，还不到发达国家的一半。这种能源消耗的比例结构，影响着城市居民生活水平的提高。

4. 环境

城市环境涉及两个方面：一是不让环境变坏，即防治污染；二是力求使自然环境更美好，主要是绿化。对城市居民生活最为重要的环境资源包括大气、水和绿地等。

(二) 城 市 容 量

城市容量指在一定的生产力技术水平和生产条件下，城市所能供养的人口数量。对于一个原始地区，其人口容量取决于自然条件，人口容量相对很小。随着人类社会的发展，人类改造自然的能力逐渐增强，劳动生产率不断提高，人口的容量随之增强。一般地，城市容量与下列因素密切相关：

1. 城市所在地区的自然条件

处在不同自然条件下的城市，所能提供的淡水资源和对污染物等的自净能力和容纳能力不同，如干旱地区的淡水资源和所能提供给城市居民的蔬菜等生活必需品的能力远小于湿润地区 。

2. 城市的技术、经济发展水平

首先，城市能容纳的劳动力数量一般是随着城市的经济发展而增大；其次，城市的生态环境可以通过经济投资和加强管理而得到改善，从而使城市的容量得以扩大。现代城市的人口容量，主要取决于三个方面：① 城市生产发展的人口容量，即城市容纳劳动力的最大数量；② 城市生活条件的人口容量，即住房、市内交通、供水、供电、商业服务网点、学校、医院、文化娱乐设施等的综合容纳能力(容纳的人口数量)；③ 城市生态环境的人口容量，即城市提供物质、能量和城市接收、处理生活垃圾和工业垃圾的能力。

(三) 城市生态平衡的标志

城市生态平衡，就是城市生态系统的高度有序。包括生态平衡、综合经济平衡和社会安定三个方面。城市生态平衡的标志可以从以下几个方面分析：

1. 城市三个效益达到最佳

三个效益即经济效益、生态效益和社会效益。不同规模、不同地区城市的经济效益相差是很大的；一般而言，大城市比中、小城市普遍经济效益高；在我国目前情况下， 沿海城市的经济效益又优于内地城市。

生态环境效益过去往往被忽视，但生态环境是长远利益，是经济持续发展、效益不断提高的基础，因为发展社会经济的资源和能源以及废物输出是与生态环境密切相关的。生产资料的数量和效力以及自然状况，如大气、土壤和水体等，在相当程度上制约着生产力的部分要素。居民生存需求的主要方面也是由生态环境所提供的。生态效益是一个城市，也是一个国家和地区社会物质文明和精神文明的重要标志。生态环境破坏后造成的直接经济损失是显而易见的，可以用货币来计算，但是更有不能用货币计算的经济损失。例如，不合理的生产发展带来的生态环境质量下降，会威胁到居民健康，甚至会对劳动力产生直接损害。由此引发的居民的疾病和死亡，支付的额外医疗费、保健

费、抚恤费以及缺勤的误工费，同样造成严重的经济损失，加重城市的经济负担。长此，必然影响到生产的进一步发展，使经济发展最终受到阻碍。所以生态效益与经济效益紧密相关，生态环境问题也是一个经济问题。社会效益主要是指精神文明建设，反映居民精神生活、精神面貌方面的内容。

2. 城市各子系统协同有序、有计划按比例发展

城市各要素、各子系统要达到协同就要有一定的比例关系，不可失调。各子系统的内部比例要平衡，各子系统之间的比例也要平衡。为了达到这种平衡，首先要调整好以下几个关系：① 人类消费需求、社会经济发展需求与生态系统自我补偿能力之间的平衡协调关系； ② 人口与资源、环境之间的平衡协调关系；③ 人口的数量与城市基础设施的平衡协调关系；④ 城市的生产发展与生活消费之间的平衡协调关系。总之一个城市的人口规模与城市容量之间应达到平衡协调。

3. 城市生活质量不断提高

城市生活质量不同于城市生活水平的概念，生活水平多以货币和实物的数量来反映。生活水平是生活质量的基础，但是单纯的、丰富的物质生活享受并不能全面反映生活质量的提高，生活质量还包括以心理上的满足与满意程度为准则的感觉评价。有人把城市环境生活质量目标概括为舒适、方便、和谐、康乐四个方面的集合。① 舒适：生活、居住、工作、休息的满足与满意程度。② 方便：人们的各种生理和心理需要在时间和空间上分配的水平和质量。③ 和谐：物质、精神、社会政治生活多要素之间的和谐有序发展，如人与人、人与自然、人与社会之间的和谐，城市结构与功能的和谐，自然景观美与人文景观美之间的和谐，以及社会安全感等。④ 康乐：心理上和生理上的健康发展，如医疗保健、文艺享受、旅游休憩等。

衡量生活质量的指标可以参照如下表达式：

$$I_i=W_i\frac{P}{S}$$

式中：I_i 为对某一生活领域 i 的满意指数，P 为因素的实际状态，S 为因素的期望状态，W_i 为权重。而生活质量的表达式由 $Q=I_1+I_2+\cdots+I_n$ 得出，式中 1，2，···，n 为生活领域的维数。

也可以用生态环境的适宜度表示。适宜度是综合反映城市社会生态环境质量的量度，是指城市生态环境为人类的生存和延续所提供的各种条件与人类对这些条件需求之比的总合。这些条件包括人口密度指数、人类活动强度指数、物质生活指数、居住指数、教育服务指数、医疗服务指数、交通便利指数、环境污染指数、安全指数等。

如这些单项因素的适宜度用 $S_1(t)$，$S_2(t)$，···， $S_n(t)$表示，则有 n 维矢量

$$S(t)=\begin{cases} S_1(t) \\ S_2(t) \\ M \\ S_n(t) \end{cases}$$

显然，各种因素对人类生存和延续所产生的影响是不同的，即权重不一样，由此定义适宜度指数为

$$C(t)=\sum_{i=1}^{n} a_i S_i(t)$$

式中：a_i为$S_i(t)$的权重，并有$\sum_{i=1}^{n} a_i = 1$。

三、城市生态系统的调控原则、理论及途径

城市生态调控的目标有二：一是高效，即高的经济效益和发展速度；二是和谐，即和谐的社会关系和稳定性。经济高效与社会和谐是相辅相成的两个方面，前者是正反馈过程，强调发展的速度；后者是负反馈过程，强调发展的稳定。二者既是矛盾的又是统一的。城市生态调控的目的，在于利用一切可以利用的机会，充分提高物质能量利用效率，使系统风险最小，而综合效益最高，从而使社会、经济、环境得到协调发展。

（一）城市生态系统调控的原则

1. 协调共生原则

城市生态系统中各子系统之间、各元素之间是互相联系、互相依存的，在调控中要保证它们的共生关系，达到综合平衡。共生可以节约能源、资源和运输，带来更高的效益。如采煤和火力电厂的配置、公共交通网的配置等。

2. 循环再生原则

注重综合利用物质，建立生态工艺、生态工厂、废品处理厂等，把废物变为能够被再次利用的资源。如再生纸、垃圾焚烧发电、污水的净化处理和再利用等。

3. 持续自生原则

在考虑到城市土地、淡水、能源等资源状况的条件下，在一定的阈值范围内，使系统保持具有自我调节和自我维持稳定的机制，或者说使人能够控制城市生态系统。城市生态系统的控制主要是人为的，而不像在自然生态系统中那样，依靠负反馈机制。其系统自我调节能力的强弱主要取决于信息反馈的准确和迅速程度，以及管理决策部门判断的水平。如果信息失真或不通畅，决策跟不上，就会造成失误。

(二) 城市生态控制论

德国 Vester 教授(1976)的《在危机中的城市系统》提出了城市生态控制论的 8 条原则，即：① 负反馈超过正反馈；② 系统演替的目标在于功能的完善，而不是组分的增长；③ 系统生产的目标在于产品的服务功效，而不是产品的数量；④ 善于利用一切可以利用的甚至对抗性的力量，为系统服务；⑤ 产品的多重利用原则；⑥ 物质再生循环原则；⑦ 共生原则；⑧ 生物设计原则。

生态系统的优化原理很多，归纳起来不外乎两条：一是高效，即物质能量的高效利用，使系统生态效益最高，其生态工艺原理包括再生原理、机巧原理和共生原理。二是和谐，即各组分间关系的平衡融洽，使系统演替的机会最大而风险最小。其生态协调原理包括相生相克原理、最适功能原理和最小风险原理。城市生态控制论的任务，就是要依据这两条基本原理去调控城市的人流、物流、能流、信息流和货币流(王如松　1988)。

生态系统功能正常与否的关键在于自我调节能力的强弱。自然生态系统靠竞争、共生、自然选择来自我调控各种生态关系，达到系统整体功能的最优。以市场经济为主的人工生态系统以价格、利润为杠杆，通过竞争、吞并等各种手段，自发实现系统功能的平衡和稳定。而以计划经济为主的人工生态系统，则是靠计划和决策部门的行政命令和指令性计划，对各子系统进行等级递阶控制。其成败的关键，在于其各个等级子系统的人工信息反馈的灵敏度和决策部门的决策手段。当反馈信息失真，反馈强度不够，反馈相位延滞或决策手段跟不上时，就起不到自我调节作用，导致生态平衡失调。

(三) 城市生态系统调控的途径

城市生态调控的途径有 3 种：

1. 生态工艺的设计与改造

根据自然生态最优化原理设计和改造城市工农业生产和生活系统的工艺流程，疏浚物质、能量流通渠道，开拓未被有效占用的生态位，以提高系统的经济、生态效益。其基本内容包括：能源结构的改造，生物资源的利用，物质循环与再生，共生结构的设计，资源开发管理对策，化学生态工艺以及景观生态设计等。

2. 生态关系的规划与协调

运用系统科学方法、计算机工具和专家的经验知识，对城市生态系统的结构与功能、优势与劣势、问题与潜力，进行辨识、模拟和调控，为城市规划、建设和管理提供决策支持的一种软科学研究过程。常用的系统分析方法有统计分析法、模型模拟法、数学规划法等传统硬方法及近年发展起来的一些软方法，如系统动力学法、层次分析法、环分析和专家系统等。

生态规划的最终目标是要调整、改革城市管理体制，增强和完善城市共生功能并改

善城市决策手段，建立灵敏有效的决策支持系统。

3. 生态意识的普及与提高

城市系统受人的行为所支配，而人的行为又受其观念、意识所支配。因此，在城市管理部门及市民中普及和提高生态意识(包括系统意识、资源意识、环境意识和持续发展的意识等)，倡导生态哲学和生态美学，最终克服决策、经营及管理行为的短期性、盲目性、片面性及主观性，从根本上提高城市的自组织、自调节能力，是城市生态调控最迫切、最重要的一环。

以上三方面的难点都在于面对城市这个综合体怎样进行综合。人与生物圈委员会(MAB)于 1984 年 Suzdal 会议纪要中就指出，“综合”二字有三方面的含义：一是组织上的综合，研究的组织自始至终都要有决策者、技术人员、研究人员及公众等多学科人员参加；二是方法上的综合，要从自然科学、社会科学等各个领域吸取营养，从系统的横向关系、过程(流)及网络结构入手进行深入全面地探讨；三是成果上的综合，在方法上、技术上要有普遍性、可比性和可行性，要促进各类城市课题之间的情报交流和信息共享，相互了解怎样确定问题和解释结果。

在内容上，MAB 的报告还建议开展以下 11 个方面的综合研究：

① 将城区、近郊和农村作为一个复合系统，研究大范围内的城市分布格局；

② 必须与区域规划相结合，研究城市问题；

③ 应把环境数据纳入经济决策方程；

④ 应建立一套可行、可比的评价社会、经济和自然价值的生态指标体系；

⑤ 应将一些无形的、难以定量的生态因子综合进去；

⑥ 不能只根据现状作静态研究，要考虑5~20年的中长期尺度作动态研究；

⑦ 应开展跨行业、跨部门的子系统间相互关系及相互冲突目标的研究；

⑧ 规划及执行过程中，自始至终要将社会、经济和自然变量综合考虑，进行全局性判断，而不是偏向某一具体部门；

⑨ 系统分析和模拟，是决策者不通过实际试验就能预测发展趋势的有力工具，应大力提倡；

⑩ 研究结果应向决策者提供一系列可供选择的替代方案，并将其向公众宣传，以发动群众参加决策咨询；

⑪ 应将人的价值观、创造性、直觉等主观因素综合进去。

(四) 走向生态城

生态城是俄罗斯生态学家 Yanitsky 于 1987 年提出的一种理想城模式，旨在建设一种理想的居住环境。其中，技术和自然充分融合，人的创造力得到最大限度的发挥，而居民的身心健康和环境质量得到最大限度的保护。换句话说，就是指按生态学原理建立起来的一类社会、经济、自然协调发展，物质、能量、信息高效利用，生态良性循环的

人类聚居地，即高效、和谐的人类居住环境(王如松　1990)。

生态城的“生态”，包括人与自然环境的协调关系和人与社会环境的协调关系两层含义。生态城的“城”指的是一个自组织、自调节的共生系统。MAB 报告(1984)中提出生态城规划的 5 项原则是：① 生态保护战略(包括自然保护，动、植物区系及资源保护和污染防治)；② 生态基础设施(自然景观和腹地对城市的持久支持能力)；③ 居民的生活标准；④ 文化历史的保护；⑤ 将自然融人城市。

Yanitsky 将生态城的设计与实施分成 3 种知识层次和 5 种行动阶段，即时-空层次、社会-功能层次、文化层次，以及基础研究、应用研究、设计规划、建设实施和有机组织结构的形成 5 个阶段。

生态城包括三个层次的内容：第一层次应为自然地理层。这一层次是城市人类活动的自发层次，是城市生态位的趋适、开拓，竞争和平衡过程，最后达到地尽其能，物尽其用；第二层次是社会-功能层，重在调整城市的组织结构及功能，改善系统之间的冲突关系，增强城市这个有机体的共生能力；第三层次即文化-意识层，旨在增强人的生态意识，变外在控制为内在调节，变自发为自为。

生态城的衡量指标：一是生态滞竭系数，测度城市物质能量的流畅程度；二是生态协调系数，测度城市的组织合理程度；三是自我调节能力，测度城市的生态成熟度。

第五节　城市建设的生态设计

所谓生态设计，是指设计师按照生态学思想和生态学原理，预先构想事物应该是怎么样的，从而拟定所设计事物的蓝图。城市生态设计是一类新型的城市设计，它是基于城市复合生态系统的理论，对城市系统中的土地利用进行最佳组装，对城市系统中的各种景观(包括自然景观、建筑景观、社会景观和历史文化景观等)进行美化，尤其强调能量的有效利用与节能、城市的绿化空间、自然生境的保护和交通的一体化建设。

1987 年，联合国环境与发展委员会发表了《我们的共同未来》的纲领性文件，提出了“可持续发展”的概念，1992 年在巴西里约热内卢召开的世界环境与发展大会上再次强调了可持续发展的重要性。“可持续发展应该是这样一种发展，它既能满足当代的需求， 又不危及后代满足其需求的能力”。城市生态设计应以“可持续发展”理论为指导，强调建设结构合理，功能协调，效益良好，风景优美的现代化城市。

一、可持续城市生态设计的思想

生态设计是由于生态问题和生态学的发展提出来的。生态问题的严重性质使人们认识到，人类活动必须考虑生态后果，从而提出生态设计问题。生态学作为一门学科、一种思想具有普遍性，也为生态设计提供了可能性。生态学成为设计思想的重要部分，这是设计思想的重大变化。

城市是由一定数量的人口和城市所在的自然环境和社会环境构成的生态系统。它是人类设计和建造的人工生态系统。它的首要特点是人口大量集中，并把世界上的人口越来越多地吸引到城市中来。大量人口生活在城市，城市居民是城市生态系统的主体。为

了满足城市居民的需要，创造了社会文化环境，如房屋、道路、通讯、电气、煤气、水道、工厂、市政管理设施、生活设施、医疗、文化、旅游和福利设施等，形成独特的城市建筑景观。这样就强烈地改变了原有的自然生态系统，例如植被由房屋和水泥路面取代，野生动物多被赶跑，原有地形地貌改变，土壤状况、地表水和地下水水文状况、空气成分和小气候等都发生重大变化，在这里是以人工生态系统代替原有的自然生态系统。

城市生态系统区别于自然生态系统，它的主要特征是：

1) 城市生态系统中生产者小于消费者。自然生态系统中生产者与各级消费者形成金字塔营养结构，生产者数量大于消费者。城市生态系统中人口密集，作为消费者的居民生物量大于植物的生物量，生产者与消费者成倒金字塔结构。

2) 城市生态系统不是一个“自给自足”的系统，要从系统外输入大量物质和能量。自然生态系统只要输入太阳能，依靠植物的生产过程以及生态系统内物质循环和能量转化便可以永远维持下去。但是，城市生态系统由于消费者的数量大于生产者，必须从外部输入大量物质和能量。

3) 城市生态系统是人工建造的生态系统，这里人的活动起关键性作用，虽然自然生态过程的规律仍然起作用，但人类建设城市的活动完全改变了自然生态过程，最集中地体现人对自然的作用。它表现人类社会的社会发展性质、民族特点、经济发展水平、科学技术进步等，鲜明地表现它的社会性。

但是，传统的城市设计思想并不全面考虑上述特点，虽然也产生了许多良好的城市设计，但也带来许多严重的城市问题。例如，侯仁之先生指出，北京城市原有的规划设计是封建社会时期我国都城建设的一个杰出典型。它的城市设计的主题思想是：①“择中论”的思想，帝王的朝廷位居全城的中心，即便于四方贡献，更有利于控制四方。② 全城沿中轴线展开平面布局的设计思想，它表明封建帝王“惟我独尊”的思想。这种城市设计的主题思想形成北京全城平面布局上的整体感和稳定感，从美学观点上引起西方建筑学家和城市规划学者的无限赞叹，被人们称之为“世界奇观之一”和“是地球表面人类最伟大的单项作品。”

但是，这种设计同现在大多数大城市的设计一样，带来严重的生态问题：① 没有留出对于调节环境有重要作用的足够的陆地，没有为城市的生产和生活输出废弃物、垃圾和污水设计处理设施。这样，把超过环境自净能力的大量废弃物排向环境，造成城市大气污染，水体和土壤污染，噪声污染等，损害了环境自净能力，使环境质量下降，从而影响经济的进一步发展和造成对人体健康的危害。② 在一个狭小的地区内集中过多过密的人口，造成居住拥挤、交通紊乱、能源和资源紧张、供水不足等许多不便，从而使城市居民生活质量下降。

城市问题的产生，违反了人类建造城市的目的。人们为解决上述城市问题，提出城市生态设计，或者城市生态学研究。这就是应用生态学原理研究城市生态系统的结构与功能，通过城市生态系统的合理布局，实现城市的社会、经济、自然环境的综合平衡和协调发展。其中重要的有两点：

1) 城市的合理规划。无论新城市建设还是旧城市改造都必须考虑它的生态条件。例如，城市的性质如工业城市(又分以什么工业为主)、商业城市、政治和文化城市、旅

游城市和港口等，应根据它所在的地理位置，地理状况，资源条件(包括能源、水资源和其他物质资源)，交通和社会、经济，文化、历史等条件进行规划。城市的规模要以环境容量，如土地面积、绿地面积、水资源和能源供应、环境自净能力的大小等为依据。土地利用方面应根据地理条件设置城市的功能分区，如工厂区宜置于下水、下风方向，便于污染物质的稀释扩散，若建在上水、上风方向(如北京西郊重工业区)则会加重城市空气和水体污染；交通要道设置商业区；丘陵地设置住宅区；山地、水域和风景区建设公园、绿地和旅游设施。根据方便居民生活和为生产服务等原则建设市政管理、生活设施、医疗、 文化、教育、科研等设施，留出足够的园林和绿地，并合理地加以分布，注意建设垃圾处理设施、污水处理设施等为城市废弃物输出留下出路。

2) 调整城市人流、物流和能流。在保证城市正常功能的前提下，采取适当措施改变城市人流、物流、能流的方向、路线和数量，使城市人口及其流动适中，物质和能量充足和高效率地利用，减少物质和能量消耗。例如，控制城市人口和居民消费，这是控制城市物流和能流的重要措施；增加城区绿地，从而增加环境容量，提高城市环境系统自然净化能力；按照生态条件设置生产部门，从就近原料产地供应原料，减少运输和原材料损耗；通过改革工艺和采用新技术，提高材料利用率，提高产品的质量，改革产品规格，废水循环使用，废物回收利用，通过废物资源化减少废弃物排放，粪便作为有机肥用于农田，有机废水和生活污水经初步处理用于农灌；垃圾分类处理；提倡节约，鼓励采用自然保暖和采光系统，减少资源消费等。

总之，通过城市生态学研究，产生结构合理，功能协调，效益良好，风景优美的城市生态系统设计。城市设计思想的这种转变，将为现代化城市建设发挥越来越重要的作用，城市生态学研究会越来越受到重视(余谋昌　1991)。

二、可持续城市生态设计原则

(一) 解决问题的方法始于脚下

从本质上讲，城市生态设计是为地方设计的，它必须充分反映当地的气候特征、土地类型、水资源状况和风俗习惯等。因此，当地的知识对于城市的生态设计是无价之宝，它给我们提供了有关气候、植物、动物、土壤、水流等方面专门的信息以及传统文化中可持续性的成分，它对生态设计是适用的。而这些知识主要来自于当地人民和资料记载。对城市建设和发展过程中出现的那些复杂性的反应及蝴蝶效应，也必须依据当地条件， 根据城市复合生态系统理论加以识别，并区别利用。

另一方面，我们应有目的地把城市可持续发展的思想带入每个家庭，即融入日常生活中，包括孩子的教育。通过建立可持续的社区，达到促进城市可持续发展的目标。如果我们对我们居住地的细微差别都很敏感、都会识别，那我们就不可能有任何破坏居住区生态环境的企图或不良行为。

（二）生态审计原则

城市生态审计包括对城市生态系统中的森林、矿物、大气、水和土壤等自然财富进行经济学定量，对城市中工业过程的各种生态效应进行经济损失计量，例如二氧化硫与酸雨、二氧化碳与温室效应、工业污水排放与水体污染、生活垃圾堆放与土地侵占等。城市生态审计是城市生态设计的主要分析工具，在工业过程、产品、建筑物、社区或国家等不同的层次水平上，为城市生态环境影响的评价提供了一个逻辑连贯的框架。

作为城市生态审计的特殊形式，生命循环分析是对材料、能量和有毒物在整个使用期所产生的生态效应进行分析。例如，制造某种材料及其相关的产品需要多少能量?把建筑材料从生产地运输到建设地用了多少能量?这种材料是否容易从当地获取?这种材料是否容易进行共循环?在制造、安装等过程中产生多少废弃物?有没有更好的方法处理建筑及其他废弃物?等等。

城市生态审计要求我们必须全面考虑，通盘计价。其中，电流涉及热电厂、核电厂、水电、制热、风能和太阳能等各个方面；垃圾流包括收集、填埋、处理以及填埋气的产生和利用；天然气流主要是天然气的开发和利用；污水流包括生活污水和工业污水的产生、处理和危害；水流包括降水(雨、雪)、河水、地下水、雪融水；食物流主要是蔬菜、水果、肉类、粮食等。

（三）设计与自然相融原则

人类是自然的一个组成部分，应该与自然成为伙伴。因此，我们渴望我们的设计与我们生活的自然世界相协调、相融洽。实践证明，这是一个减少生态破坏和环境不良影响的战略手段。我们在自然中间，自然在我们中间。我们和自然应该是一个相辅相成的关系，不可分割。

设计与自然相融的原理要求我们，应该把废弃物等同于食物。例如，牧草在太阳光的作用下，把二氧化碳和水作为食物进行同化；对于牧草来说，它则作为牛或羊的食物；牛或羊的排泄物又进一步成为土壤的养分。如此循环往复，基本上不存在什么废弃物。对于城市中的商业过程、工业过程和建设过程，也是一样。把废弃物转化为食物的战略，在城市设计中是非常必要的。用人工湿地处理污水的方法，就是这种思想的体现，它避免了传统污水处理方法的某些不足。

设计与自然相融的原理还要求我们对生物多样性进行最大限度的保护。对于城市系统，主要是指物种的多样性。这种多样性在小区或社区水平上，则体现为生态系统的多样性。生物多样性和文化多样性紧密相连，互相促进，因为生态系统的多样性不仅是自然的特性和生态稳定性的基础，而且还促使生活方式和文化的多样化。

（四）人人都是设计师

我们在生态设计过程中，应倾听每个人的意见。其一，这是培养设计智能的需

要。因为在我们的日常生活中，在与居民的接触中，通过交谈，可以获得一些设计创新的线索。不仅如此，我们还可以采用“生态设计社区专题讨论会”或者举行“社区生态设计比赛”等积极的形式进行。其二，就社区设计来说，设计并不是中性的，它要受到政治胁迫和经济压力的影响。为了尽量减少这方面的冲击，设计必须加入民主的成分。

(五) 使自然可见

有效的设计有助于使我们知道自己在自然界中的位置，那种脱离自然、远离自然的城市，会阻止城市居民对生物的喜爱，从而使他们容易滋生许多破坏环境的不良习惯和行为。我们在生态设计中最为重要的方面，是要充分理解自然，把自然系统尽量地放大。与此同时，使城市中那些暴露的系统(建筑物、街道、广场等)与过程(工业过程)尽量从我们的视线中消失(王如松等 2000)。

三、可持续城市生态设计方法

只要我们能够真正把握可持续城市生态设计的原理，就可以避免不成功的城市生态规划。也就是说，成功的城市生态设计，体现了可持续城市生态设计原理的灵活运用。

1. 可持续城市生态设计的基本方法

1) 公众识别的方法。注意对公众感兴趣的事物或存在问题的识别，重视、考虑城市本身的发展问题，而不是来自与开发项目有密切关系的委托人或用户的意见。

2) 广泛合作的方法。在整个生态设计和城市建设过程中，联合各个领域的专家，组合各个学科的知识，应用各种先进的经验。

3) 创造性设想的方法。城市生态设计中重视鼓励专业人员和城市居民的创造力和想像力。

4) 交换观点的方法。用各种形式的媒体(写、讲、图)以及三维设计，交换各种城市生态设计的观点和设想。

5) 普及知识的方法。对于那些成功的或不成功的城市生态设计及其已知的设计过程，应该教给学校的每个孩子，让每位公众和决策者知道。

2. 城市生态设计过程

1) 分析或解析。理解、确定城市生态系统的基本特征，包括历史与发展、物理与社会结构，交通路线与路标、优势与劣势。

2) 想像。提出城市发展的三维形态与生态规划的目标。

3) 战略。提出城市生态设计的战略，在诸如交通、公共场所、建筑物高度、路标的位置等更为广泛的领域建立当地生态设计决策的原则。

4) 准则。提出城市生态设计的准则，表明当地的活动如何能够支持战略方针，这些生态设计标准包括建筑物高度、临街空地设计、通道、开放空间、树木栽种、街道设

计、居室布局、公共安全等指导细则。

5) 概述。用直观的方法画出更为详细的城市生态设计图，并给予较详细的说明。

6) 反馈。向社会公布生态设计，回收反馈意见。

7) 修改、论证、定稿。

四、城市生态设计研究展望

生态设计作为一门科学，是最近几年才有的事。但是，它能解决传统城市规划无法克服的许多问题。可以预料，生态设计在今后的城市发展中将发挥巨大的作用。目前和今后一段时间内它的研究的重点有：

1) 城市交通污染与拥挤的问题，特别是城市土地利用规划、交通布局与环境可持续性的关系。

2) “紧凑”城市与城市人口适中密度。包括西方国家现有城市地区住房密度增加的可能性；发展中国家城市的健康问题。

3) 城市中心的发展问题。在西方国家，主要是城市中心的复兴及恢复元气的问题； 在发展中国家，主要是城市中心的绿化建设与空间发展问题。

4) 城市居民的生活质量问题。包括在休闲与商业投资方面的目标以及使城市具有竞争力的需要。

5) 与城市的安全、活力和可持续性有关的综合发展问题。

6) 城市中大工业区的再发展问题。

7) 城市中心以外居住地的发展和城郊的商业发展的压力。

8) 城市中建筑环境保护与自然环境保护的关系与相互作用。

第六节　城市生态环境规划

过去，一些城市在建设发展中由于缺乏规划，各自为政，罔顾长远效应，只顾眼前利益，在市区内“见缝插针”地兴建工厂，造成居住区与工业区犬牙交错非常混杂的格局，至今仍留下难以治理的问题。此外，在城市兴建中由于缺乏对当地环境、资源及历史的了解，不切实际地盲目发展所造成的损失也是屡见不鲜的。从前面的讨论中可知，城市作为一个生态系统，它的各个组成成分间都是相互联系、相互影响的。要解决城市发展中的环境、资源、人口以及住房、交通等问题，都不能就事论事，仅靠单项规划加以解决。它要求人们做好城市生态规划，以此作为城市生态建设和管理的依据(宋永昌等　2000)。

一、城市生态规划的概念

生态规划作为一种学术思想有着较为悠久的历史，其产生可以追溯到 19 世纪末。Marsh 于 1864 年首先提出合理地规划人类活动，使之与自然协调而不是破坏自然。Powell1879 年强调应制定一种土地与水资源利用的政策，因地制宜地利用土地，实

行新的管理机制和新的生活方式。Geddes(1915)在《进化中的城市》一书中进一步强调应把规划建立在研究客观现实的基础上。在规划过程中，充分认识自然环境条件，根据地域自然环境的潜力与制约因素来制定规划方案。这些著作开创了生态规划的新思想，标志着生态规划的产生和形成(欧阳志云，王如松 1995)。

19 世纪末 20 世纪初，生态规划得到了迅速发展。Howard(1898)的“田园城运动”、美国芝加哥人类生态学派及美国区域规划协会的工作都蕴含有生态规划的哲理，并对后来美国宾夕法尼亚大学 McHarg 等人的工作产生了深刻的影响。McHarg 指出：“生态规划是在没有任何有害的情况或多数无害条件下，对土地的某种可能用途进行的规划。”我国学者刘天齐等(1990)也认为，生态规划的概念是指生态学的土地利用规划。冯向东(1988)认为，城市生态规划是在国土整治、区域规划指导下，按城市总体规划要求，对生态要素的综合整治目标、程序、内容、方法、成果、实施对策全过程进行的人工生态综合体的规划。欧阳志云、王如松等(1995)强调生态规划不能仅限于生态学的土地利用规划，它是城乡生态评价、生态规划和生态建设三大组成部分之一，并认为城市生态规划具有以下特点：

① 充分了解规划区域内自然资源与自然环境的性能和环境容量，以及自然生态过程特征与人类活动的关系；

② 强调城市发展应立足于当地社会经济与资源条件的潜力，强调系统的开放，形成城市经济优势和城市社会、经济与生态环境优势的互补，而不是建立封闭的自然经济系统；

③ 从人的生产、生活活动与自然环境和自然生态过程的关系出发，追求城市整体的优化、总体关系的和谐和各部门、层次之间的和谐；

④ 强调经济发展的高效性和持续性，而不是简单的高速度。城市的发展是城市社会、经济与生态环境质量的改善与提高，系统自我调控能力与抗干扰能力的提高，旨在全面改善城市可持续发展的能力。

Book 等人(1990)认为：“生态规划是出于一种需要，即把环境看做是多种多样的相互作用的系统，生态规划应该在单项规划的综合上作出贡献，应该对各个单项规划提出评估，从而把传统评估中必不可少的自然平衡和资源保护加以拓展。”Sukopp 和 Wittig(1993)认为：“生态规划必须完成两个互为条件的中心任务：其一是要把单项的专业规划进行汇总和综合，以便有可能从生态层面上去考虑更高一级的规划，如区域规划、土地利用规划或者景观规划等；其二是它必须指出各个单项规划之间的联系，并从生态学观点对各个单项规划提出建议，以便取得共识。”

看来土地利用规划虽是城市生态规划的核心部分，但不能把城市生态规划仅局限于土地利用规划，而应以生态学原理为指导，运用环境科学、系统科学的方法，对城市复合生态系统进行规划，调节系统内的各种生态关系，改善系统的结构和功能，确保自然平衡和资源保护，以促进人与自然的协调发展。

城市生态规划既与城市规划和环境规划有着密切的联系，但又有一定的区别。城市规划是在区域规划的基础上，根据国家城市发展和建设的方针、经济技术政策、国民经济和社会发展计划，以及城市的自然条件和建设条件等，合理地确定城市发展目标、城市性质、规模和布局，布置城市体系，重点强调规划区域内土地利用、空间配置和城市

产业及基础设施的规划布局、建筑密度和容积率的合理设计等，也可以说主要是城市物质空间与建筑景观的规划。环境规划，强调规划区域内大气、水体、噪声及固体废弃物等环境质量的监测、评价和调控管理；而城市生态规划则强调运用生态系统整体优化的观点，在对规划区域复合生态系统的研究基础上，提出资源合理开发利用、环境保护和生态建设的规划，它与城市总体规划和环境规划紧密结合、相互渗透，是协调城市发展建设和环境保护的重要手段。

二、城市生态规划的原则

城市生态规划应以“可持续发展”理论为指导，强调在城市发展过程中合理利用资源，维护好人类生存环境，既要考虑当代人的福祉，又要为后代留下发展的空间。在规划中需要贯彻以下原则。

（一）整体优化原则

城市生态规划坚持整体优化的原则，从生态系统原理和方法出发，强调生态规划的整体性和综合性，规划的目标不只是城市结构组分的局部最优，而是要追求城市生态环境、社会、经济的整体最佳效益。城市中各种单项规划都要考虑它的全面影响和综合效益，各类人工建筑物都不能仅考虑建筑物本身的华美，而应顾及到建筑物可能造成的对生态与环境的干扰和破坏。城市生态规划还需与城市和区域总体规划目标相协调。

（二）协调共生原则

在城市生态规划中必须遵循协调共生的原则。协调是指要保持城市与区域，部门与子系统各层次、各要素以及周围环境之间相互关系的协调、有序和动态平衡；共生是指不同的子系统合作共存、互惠互利的现象，其结果是所有共生者都大大节约了原材料、能量和运输量，系统获得了多重效益。不同产业和部门之间的互惠互利、合作共存是搞好产业结构调整和生产力合理布局的重要依据。部门之间联系的多寡和强弱及其部门的多样性是衡量城市共生强弱的重要标志。

（三）功能高效原则

城市生态规划的目的是要将人类居住的城市建设成为一个功能高效的生态系统，使其内部的物质代谢、能量流动和信息的传递形成一个环环相扣的网络，物质和能量得到多层分级利用，废物循环再生，系统的功能、结构充分协调，系统能量的损失最小，物质利用率最高，经济效益最高。

(四) 趋适开拓原则

城市生态规划坚持趋适开拓原则，在以环境容量、自然资源承载能力和生态适宜度为依据的条件下，积极寻求最佳的区域或城市生态位，不断地开拓和占领空余生态位，以充分发挥生态系统的潜力，强化人为调控未来生态变化趋势的能力，改善区域和城市生态环境质量，促进城市生态建设。

(五) 生态平衡原则

城市生态规划遵循生态平衡的理论，重视搞好水资源和土地资源、大气环境、人口容量、经济发展水平、园林绿地系统等各要素的综合平衡；合理规划城市人口、资源和环境，合理安排产业结构和布局、城市园林绿地系统的结构与布局，以及城市生态功能分区，努力创造一个稳定的、持续发展的城市生态系统。

(六) 保护多样性原则

在城市生态规划中要贯彻生物多样性保护原则，因为城市中的物种、群落、生境和人类文化的多样性影响着城市的结构、功能以及它的可持续发展。在制订城市生态规划时应避免一切可以避免的对自然系统和景观的破坏，尽量减少水泥、沥青封闭地面；保护城市中的动、植物区系，为自然保护区预留足够的土地，以及保留大的尚未分割的开敞空间；对特殊的生境条件（如干、湿以及贫营养等生境)都应加以保护，因为这些生境条件一旦消失，物种就会减少。对城市景观中的各种典型成分也应加以保护，物种和群落多样性保护是通过不同土地利用类型的保护而实现的，此外还要保护城市中人类文化的多样性，保存历史文脉的延续性。

(七) 区域分异原则

城市生态规划坚持区域分异的理论，在充分研究区域和城市生态要素的功能现状、问题及发展趋势的基础上，综合考虑区域规划、城市总体规划的要求以及城市现状，充分利用环境容量，搞好生态功能分区，以利于居民生活和社会经济的发展，实现社会、经济和环境效益的统一。

三、城市生态规划的主要内容

城市生态规划的对象是一个由自然生态要素和人工生态要素复合而成的高度人工化的生态系统，因子众多，复杂多变，故规划内容应根据城市的具体情况，突出重点、因地制宜、有针对性地拟定。城市生态规划的主要内容有以下几方面。

(一) 生态功能分区规划

这是进行城市生态规划的基础，是根据城市生态系统结构及其功能特点，划分不同类型的单元，研究其结构、特点、环境污染、环境负荷以及承载力等问题。在功能区划时应综合考虑地区生态要素的现状、问题、发展趋势及生态适宜度，提出工业、生活居住、对外交通、仓储、公建、园林绿化、游乐等功能区的划分以及大型生态工程布局的方案，充分发挥各地区生态要素的有利条件，及其对功能分区的反馈作用，促使功能区生态要素朝着良性方向发展。

具体操作时，可将土地利用评价图、工业和居住用地适宜度等图纸进行叠加，并结合城市建设总体规划综合分析，进行城市功能分区。功能分区应遵循下列原则：① 有利于城市居民生活；② 有利于社会经济的发展；③ 有利于生态环境建设，使城市区域内环境容量得以充分利用而又不超出环境容量的阈值。

在满足上述条件的基础上，功能分区力求与城市现状布局和城市总体规划协调一致，实现三个效益的统一。

在城市生态功能分区规划时要特别注意城市的产业结构。所谓产业结构系指城市产业系统内部各部门(各行业)之间的比例关系。可以用产品产量或产值来表示这种比例关系。城市产业结构的不同比例对环境质量有着很大影响。调整、改善老城市产业布局、搞好新建城市产业的合理布局，是改善城市生态结构、防治污染的重要措施。城市产业结构还有生产工艺合理设计的问题，即在工业功能区中要注意设计合理的“生态工业链”，推行清洁生产工艺。城市产业的布局应遵循三个原则：① 产业布局应符合生态要求，根据风向、风频等自然要素和环境条件要求，在对发展工业适宜度大的地区设置工业区；② 综合考虑经济效益、社会效益与环境效益的协调统一，以城市总体规划与城市环境保护规划为指导；③ 既要有利于改善生态结构，促进生态良性循环，又要有利于发展经济。

(二) 土地利用规划

城市土地利用的空间配置直接影响到城市生态环境质量，故无论是新建城市或改建城市的生态规划都必须因地制宜地进行土地利用布局的研究。除应考虑城市的性质、规模和城市产业构成外，还应综合考虑用地大小、地形、山脉、河流、气候、水文及工程地质等自然要素的制约。

城市用地构成一般可分为工业用地、生活居住用地、市政设施用地、道路交通用地、绿化用地等等，它们各自对环境质量有不同的要求，本身又给环境带来不同特征、不同程度的影响。因此，在城市生态规划中，应综合研究城市用地状况与环境条件的相互关系，按照城市的规模、性质、产业结构和城市总体规划及环境保护规划的要求，提出调整用地结构的建议和科学依据，促使土地利用布局趋于合理。

各类用地的选择应根据生态适宜度分析的结果，确定选择的标准，同时还应考虑国家有关政策、法规以及技术、经济的可行性。在恰当的标准指导下，结合生态适宜

度、土地条件等评价结果，划定出城市各类用地的范围、位置和大小。在充分考虑土地条件的前提下，按照生态适宜度的等级以及经济技术水平，确定用地开发次序的标准；根据拟定的标准，确定土地的开发次序。

（三）人口容量规划

人口是城市生态系统的主体，在城市生态规划工作中必须确定所在区域内近远期的人口规模，提出城区人口密度调整意见，提高人口素质对策以及实施人口规划对策。研究内容包括人口分布、密度、规模、年龄结构、文化素质、性比、自然增长率、机械增长率以及流动人口等基本情况。

在人口容量规划中，确定合理的人口密度是一项关键性工作，因为人口密度指标反映了不同类别城市中人口集中的程度，即在有限的地域空间范围内，人口集中居住、生活和工作的平均状态，也间接反映了城市的环境质量。在规划中要查明城市土地开发利用上的差异，均衡人口分布。随着城市人口的不断增长，城市人口密度也会逐年增长，城市人均用地将会逐年减少。我国城市人口密度偏大是我国城市问题的一大难点，如北京 1995 年全市平均人口密度为 745 人/km^2，其中城区人口密度超过 1500 人/km^2；上海 1996 年全市平均人口密度为 2057 人/km^2，市区为 4672 人/km^2，其中黄浦、静安、南市、卢湾等市中心区高达 50 000 人/km^2 左右。

国外城市用地一般人均 200m^2，特大城市的用地，英国每人大于 100m^2，美国每人大于 150 m^2，俄罗斯每人大于 200 m^2。我国 1985 年全国城市用地每人 73 m^2，上海每人仅为 26 m^2。可以说，城市越大，人口用地越紧张，城市人口密度的增加也将加重人的生理和心理压力，降低生活水平和环境质量，也容易滋生犯罪现象。因此，制定适宜人口容量的规划是城市生态规划的重要内容，将有助于降低按人口平均的资源消耗和环境影响，节约能源，充分发挥城市的综合功能，提高社会、经济和环境效益。

（四）环境污染综合防治规划

环境污染综合防治规划是城市生态规划中的重要组成部分，应从整体出发制定好污染综合防治规划，实行主要污染物排放总量控制，并建立数学模型对城市环境要素的发展趋势、影响程度进行预测；分析不同发展时期环境污染对城市生态状况的影响，根据各功能区不同的环境目标，按功能区实行分区生态环境质量管理，逐步达到生态规划目标的要求。主要内容包括：大气污染控制、水污染控制、噪声污染控制、固体废弃物污染控制等规划。在此基础上，根据主要污染物的最大允许排放量，计算各主要污染物的削减量，实行污染物排放总量控制，按系统分配削减量指标，对各功能区、各行业的综合防治方案进行综合、比较，应用最优化方法求出环境投资—效益的最佳分配，提出城市生态规划中总的污染综合防治方案。

制定城市环境保护规划，主要应考虑两个前提：① 根据污染源和环境质量评价和预测结果准确掌握当地环境质量现状、发展趋势以及未来社会经济发展阶段的主要环境

问题；② 要针对主要环境问题，确定污染控制目标和生态建设目标，在此基础上，进行功能合理分区，研究污染总量控制方案，并通过一系列控制污染的工程性措施和非工程性措施对策，进行必要的可行性论证，形成一个城市的环境质量保护规划。

1. 城市大气环境综合整治规划

城市大气环境综合整治规划的主要内容包括：在污染源及环境质量现状与发展趋势分析的基础上进行功能分区规划，确定规划目标，选择规划方法与相应的参数，规划方案的制定及其评价与决策。主要规划内容可分为三个层次，即环境现状及变化趋势的研究，模型与相应参数研究和规划方案的筛选与决策研究。城市大气环境规划主要针对在城市中量大面广、危害严重的污染物，如总悬浮颗粒物(TSP)、二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳等，各城市应根据自身特点，进行筛选。制定大气环境综合整治规划方法包括：科学地利用自然净化能力，积极开展绿化工作，加强污染集中控制和治理等。

2. 城市水环境综合整治规划

城市水环境综合整治规划，在水环境污染现状与发展趋势分析的基础上划分控制单元，确定规划目标，设计规划方案，并对规划方案进行优化分析与决策。制定规划的方法与一般步骤包括：水污染现状分析、水污染控制单元的划分、水环境污染物控制路线分析、水环境污染源治理技术经济分析、水污染防治主要措施分析等。

3. 城市固体废弃物综合整治规划

城市固体废弃物综合整治规划要求在现状调查基础上进行预测及评价，将预测结果与规划目标相对应、比较并参照评价结果，按照各行业的具体情况，确定各行业的分目标及具体污染源的削减量目标。确定不同的治理方案并进行环境经济效益的综合分析，根据经济承受能力确定最终规划方案。制定方法包括：确定固体废弃物污染控制目标，制定重点行业、企业固体废弃物治理规划，制定有毒有害固体废弃物处理处置措施等。

4. 城市声环境综合整治规划

在城市声环境质量和噪声污染现状与发展趋势分析的基础上，根据城市土地利用规划和声环境功能分区规划，提出声环境规划目标及实现目标所采取的综合整治措施。方法包括确定噪声污染整治对象、制定噪声污染整治措施等。

（五）园林绿地系统规划

园林绿地系统是城市生态系统中具有自净能力的组成部分，对于改善生态环境质量、丰富与美化景观起着十分重要的作用。近年来人们对绿地系统的认识已从过去把园林绿化当作单纯供游览观赏和景观装饰，向着改善人类生态环境、促进生态平衡的方向转化，向城乡一体化，向大环境绿化建设的方向转化；从过去单纯应用观赏植物，向着综合利用各类资源植物的方向转化。因此，城市生态规划应制定城市各类绿地的用地指

标，选定各项绿地的用地范围，合理安排整个城市园林绿地系统的结构和布局形式，研究维持城市生态平衡的绿地覆盖率和人均绿地等，合理设计群落结构、选配植物，并进行绿化效益的估算。

制定一个城市或地区的绿地规划，首先必须了解该城市或地区的绿化现状，对绿地系统的结构、布局和绿化指标做出定性和定量的评价，在此基础上可根据以下步骤进行绿地系统的规划：① 确定绿地系统规划原则；② 选择和合理布局各项绿地，确定其位置、性质、范围和面积；③ 根据该地区生产、生活水平及发展规模，研究绿地建设的发展速度与水平，拟定绿地各项定量指标；④ 对过去的绿地系统规划进行调整、充实、改造和提高，提出绿地分期建设及重要修建项目的实施计划，以及划出需要控制和保留的绿化用地；⑤ 编制绿地系统规划的图纸及文件；⑥ 提出重点绿地规划的示意图和规划方案，根据实际工作需要，还需提出重点绿地的设计任务书，内容包括绿地的性质、位置、周围环境、服务对象、估计游人量、布局形式、艺术风格、主要设施的项目与规模、建设年限等，作为绿地详细规划的依据。

（六）资源利用与保护规划

在城市建设与经济发展过程中，普遍存在对自然资源的不合理使用和浪费现象，掠夺式开发导致了人类面对资源枯竭的危险。因此，城市生态规划应根据国土规划和城市总体规划的要求，依据城市社会经济发展趋势和环境保护目标，制定对水资源和土地资源、大气环境、生物资源、矿产资源等的合理开发利用与保护的规划。

在水土流失的治理规划方面，应注重制定上游水源涵养林和水土流失防护林建设规划；禁止乱围垦，保护鱼类和其他水生生物的生存环境；积极研究和推广保护水源地、水生生态系统和防止水污染的新技术；兴建一批跨流域调水工程和调蓄能力较大的水利工程，恢复水生生态平衡；健全水土资源保护和管理体制，制定相应的政策、法规和条例。

制定生物多样性保护与自然保护区建设规划需要开展以下几个方面的工作：① 加强生物多样性保护的管理工作。包括建立和完善生物多样性保护的法律体系；制定生物多样性保护的计划；制定生物多样性保护的规范和标准；积极推行和完善各项管理制度；强化监督管理，逐步使生物多样性的管理制度化、规范化和科学化，加强执法监督检查，加强监督管理和服务。② 开展生物多样性保护的监测和信息系统建设。包括建立和完善生物多样性保护的监测网络，参与建立生物多样性保护的国家信息系统，积极开展生物多样性的国际与区域合作。③ 开展多种形式的生物多样性保护与利用方面的示范工程建设。④ 通过教育和培训，建成一支训练有素、精通业务、善于管理的队伍。⑤ 建立生物多样性保护机构，明确职责，并在各机构之间建立有效的协作，这是生物多样性保护的强有力的组织保证。

（七）城市综合生态规划

城市生态系统是一个受多种因素影响并不断变化的动态系统。它包括若干个亚系统及其子系统，各个亚系统和子系统之间的协调十分重要。因此，城市生态规划应该是一个动态的综合规划，它需要在各个单项规划的基础上，运用系统分析的方法进行综合分析，弄清它们之间的相互关系、正反馈和负反馈作用，以及各分项规划主要措施的相对重要性，以便调整系统内各子系统的比例和格局，作为政策、资源安排以及制定分期计划的基础，确保每一个方面都能获得适度发展而不超越其所允许的限度，从而保持整个城市的可持续发展。在进行城市的综合生态规划时，基础资料是不可缺少的，其中包括各类文字资料和有关图件，使城市规划具有较强的直观性和可操作性以及能够跟踪它的变化，这就需要建立资料库，其中包括数据资料库、图形库以及模型库，地理信息系统技术可为这方面提供良好的技术支持和服务。

四、城市生态规划的步骤与方法

（一）城市生态规划的步骤

城市生态规划的一般程序如图 9-5 所示。

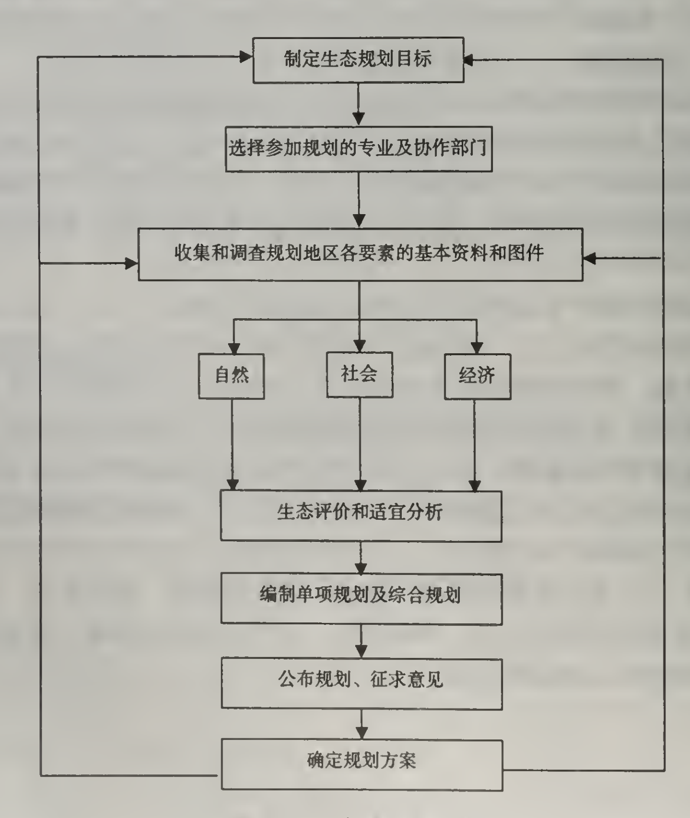


图 9-5　生态规划程序图

1) 根据规划要求选择有关专业。由于城市性质、规模和发展目标的不同，各个城市生态规划的重点也可能有所差异，而城市涉及的因素众多，不可能样样俱全，因此必须根据规划要求选择关系较密切的专业人员参加。

2) 生态要素资料的收集与调查。生态要素资料的收集与调查的目的是搜集规划区域内包括地质地貌、气候、水文、土壤、植被、动物、土地利用类型、环境质量、人口、产业结构与布局等因素在内的自然、社会、人口、经济与环境方面的资料与数据，为充分了解规划区域的生态特征、生态过程、生态潜力与限制因素提供基础。资料搜集不仅包括现状资料，也包括历史资料。在城市生态规划中，应十分重视人类活动与自然环境的长期相互影响与相互作用，如资源衰竭、土地退化、大气与水体污染、自然生境与景观破坏等问题，均与过去的人类活动有关。因此，历史资料的研究十分重要。资料收集既包括文字资料，也包括各种图件，其直观并且能提供较准确的位置。在搜集现存资料的同时，还要开展实地调查，在生态调查中多采用网格法，即在筛选生态因子的基础上，按网格逐个进行生态状况的调查与登记，工作方法如下。① 确定生态规划区范围，采用 1∶10 000(较大区域为 1∶50 000)地形图为底图，依据一定原则将规划区域划分为若干个网格，网格一般为 1km×1km，也有采用 0.5km×0.5km(网格大小视具体情况而定)，每个网格即为生态调查与评价的基本单元。② 调查登记的主要内容有：规划区内的气象条件、水资源、植被、地貌、土壤类型、人口密度、经济密度、产业结构与布局、土地利用、建筑密度、能耗密度、水耗密度、环境污染状况等。

3) 生态适宜度分析。在收集和调查取得资料的基础上对规划区域进行分析和评价，并对各类用地进行适宜度分析。

4) 编制规划。在以上几个步骤的基础上制定单项的和综合的城市生态规划，在这一过程中，地理信息系统技术将发挥非常重要的作用。

5) 公布规划草案征求意见。规划草案不仅要向领导征求意见，而且需向群众公布，广泛征求意见，公众的参与是完善规划和实施规划的重要条件和保证。

6) 确定规划，上报批准。在多方反复征求意见的基础上修订规划，最后予以确定，规划一旦确定并得到有关部门批准，即应该成为一种法律，规范着人们的行为，非经合法程序不得随意变更。

(二) 城市生态规划的方法

1. 城市生态规划方法的指标体系

指标体系是一个系统可度量的参数，以描述系统的现状和发展趋势。城市生态系统的指标体系应该体现出下列要求：① 在生产、生活和社会进步与环境质量方面能反映城市生态系统的整体性；② 反映系统时间和空间变化的特征；③ 反映系统的层次性，并能满足系统预测、结构和功能分析的要求；④ 计量范围、统计口径和含义解释及计算方法协调一致。

目前城市生态环境规划中一般将指标体系分成社会、经济和生态环境三部分，并采用综合指标评价的方法。社会指标包括人口指数、社会福利、教育指数、精神文化生活

水平等，经济指标包括经济发展水平、人均 GDP、产业结构与布局、能源交通等。生态环境指标包括土地利用指数、环境质量指数、自然资源指数。社会经济和生态环境，通过各自的总评价指数：

$$I_T=\sum_{i=1}^{n}W_iL_i\Big/\sum_{i=1}^{n}W_i$$

求出综合指数。式中：n 为参评指标的总数；W_i 为第 i 类参评指标的权重，其值可采用专家估算、层次分析法等确定，通常情况下 $\sum_{i=1}^{n}W_i=1$；L_i：第 i 类参评指标的指数，由下式给出：

$$L_i=L_j/L_{i0}$$

式中：L_j：第 i 类参评指标第 j 分项参评参数的数值；L_{i0}：第 i 类参评指标的基值。

根据社会经济和生态环境指数之总和，可将其分成好、尚好、稍差、差、最差等不同等级。

2. 生态环境规划方法

生态环境规划的主要问题是城市土地利用的生态规划，其核心技术是土地的生态适宜度分析和土地承载能力分析。

(1) 土地利用的生态适宜度分析

常见的土地利用适宜度分析方法有三种：地图重叠法、因子加权评分法和生态因子组合法。

1) 地图重叠法。这一方法又称为麦克哈格(McHarg)法。麦克哈格法的基本步骤可归纳为：① 确定规划目标及规划中所涉及的因子；② 调查每个因子在区域中的状况及分布(即建立生态目录)，并根据对其目标(即某种特定的用地)的适宜性进行分级，然后用不同的深浅颜色将各个因子的适宜性分级分别绘在不同的单要素地图中；③ 将二张及二张以上的单要素图进行叠加得到复合图；④ 分析复合图，并由此制定出土地利用的规划方案。地图重叠法是一种形象直观的方法，是可以将社会、自然环境等不同量纲的因素进行综合的土地利用适宜度分析方法。地图重叠法的缺点有二：其一是它实质上为一种等权相加的方法；其二是当分析因子增加后，用不同的深浅颜色表示适宜等级并进行重叠的方法显得相当繁琐，并且很难辨别综合图上不同深浅颜色之间的细微差别。然而地图重叠法在城市土地利用生态适宜度分析的发展上具有重要的意义，后来发展的许多新方法都是以此方法为基本蓝图的。

2) 因子加权评分法。因子加权评分法的基本原理与地图重叠法的原理相似。首先将研究的城市地区分成若干小区或进行网格化；其次选定用地的影响因子，并按这些因子分别评定各个小区或网格对这种用地的适宜度等级或评分，在确定各个因子相对重要性(权重)的基础上，对各个网格或小区进行加权求和，得到各个小区或网格对某种用地的总评分，一般分数越高表示越适宜。加权求和的方法克服了地图重叠法中等权相加的缺点，以及地图重叠法中繁琐的照相制图过程，同时避免了对阴影辨别的技术困难。加

权求和法另一重要优点是适用于计算机，这也是近年来该方法被广泛运用的原因。

3) 生态因子组合法。地图重叠法和加权求和法都要求各个因子是相互独立的。而实际上情况并非总是如此，如地面坡度>30%时，不管排水条件如何，都不适宜于高速公路的修建。但如果按加权求和或地图重叠法来做，当坡度>30%，而排水条件极好时，可能会得出中等适宜的结论。为了克服这一缺陷，城市土地利用的生态规划专家又发展了一种新的方法，称为“生态因子组合法”。因子组合法认为：对于某特殊的土地利用来说，相互联系的各个因子的不同组合决定了对这种特定土地利用的适宜性。生态因子组合法可以分为层次组合法和非层次组合法。层次组合法首先用一组组合因子去判断土地的适宜度等级；然后，将这组因子看做一个单独的新因子与其他因子进行组合判断土地的适宜度，这种按一定层次组合的方法便是层次组合法。显然，非层次组合法是将所有的因子一起组合判断土地的适宜度等级，它适用于判断因子较少的情况下，而当因子过多时，采用层次组合法要方便得多。但不管采取哪种方法，首先需要专家建立一套较完整的组合因子和判断准则，这是运用生态因子组合法关键的一步，也是极为困难的一步。

(2) 土地承载能力分析

在土地承载能力评价中，主要的两个概念是“发展变量”和“限制因子”。“发展变量”可用人口和社会经济发展来度量。“限制因子”是指限制一个地区人类活动进一步增长的因子，包括环境(如水质等)、物理(如基础设施)及心理等方面。限制因子的最大值常常可用国家或地方的标准确定，如水质；也可用专家的判断确定，如心理方面的因子等。如何确定限制因子与发展变量的关系以及如何估算限制因子对发展变量的限制程度是土地承载能力分析的关键。例如，假定某城市研究区内一特定河流中的溶解氧(DO)为一限制因子，其溶解氧的最小允许值为 6mg/L，而该河流中的溶解氧为 7mg/L，则还有 1 mg /L 可用于适当的发展。再假定，研究地区位于城中没有重大工业及商业污染排放物地带，而其发展变量是人口，那么首先应利用河流水质模型求出 DO 限值在 6mg/L 内可允许的最大排污量，然后根据人均产污量将最大排污量换算成最大允许人口数。

3. 土地生态适宜度分析与土地承载能力分析的串联使用

在城市土地利用生态规划中，土地适宜度分析和土地承载能力分析分别涉及了土地利用规划的不同侧面。适宜性分析主要是判断研究区内不同部位土地的最佳利用方向，而土地承载能力分析的侧重点是土地生态质量不致降低到无法接受的程度时所能允许发展的最大限值。只有将这两种分析串联运用才能使规划从理论上使城市土地达到最有效、最合理的利用。在研究中，把环境质量目标和实质性基础设施作为限制因子引入规划决策中，并将分析过程集中在考虑以下几个问题方面：① 使环境质量维持在所要求的水平，本地区还有多少发展余地；② 自然及社会资源对维持本地区进一步发展的能力如何；③ 为立即适应区域规划所允许的人口及开发，要花费多少费用用于提高本地区的承载能力，有什么可供选择的措施。这种分析对维护地区高质量的生态环境是极为重要的。

4. 生态环境规划的计算机辅助系统——地理信息系统

地理信息系统是计算机技术开发和发展的产物，是一种包含数字信息的搜集、存贮、处理、图形显示与输出的计算机系统。由于地理信息系统能够处理大量的数据和具有极强的图形显示、输出功能，因而应用地理信息系统进行生态环境规划是一种新的发展趋势。在生态环境规划中，地理信息系统所采用的适宜度分析模型一般为因子加权评分法和生态因子组合法。运用地理信息系统进行生态环境规划的优点不仅在于处理信息量大，速度快，而且可使规划成为一个动态过程。地理信息系统用于规划较为成功的例子是美国的 METLAND(波士顿大城市地区土地利用规划模型)。模型运作的步骤与一般生态规划相同，分为三个阶段：土地利用的适宜度分析；土地利用规划方案的制定；方案的评价。

利用地理信息系统进行生态环境规划的缺点是研制费用昂贵。如何根据我国的经济状况，将地理信息系统用于生态环境规划实践是今后的主攻方向。

5. 保证规划与建设方案的实施——生态管理

生态管理是将生态学的基本理论和思想贯穿于管理工作的全过程，使管理工作生态化。目前我国在生态管理上还没有一套成熟的法规和制度，沈阳开发区主要从以下四个方面加强生态管理：① 实行生态化管理，重点是增强决策者的经济—社会—环境协调发展意识；建立和健全生态环境管理机构；加强对大气、地表水、地下水的管理，合理利用能源、水资源。② 执行环保的有关方针、政策、制度，严格项目审批。③ 依靠科技进步，实施先进环境技术。④ 增加生态建设和环境保护投资。

生态规划与建设研究是多学科的综合性研究，应与中国的国情与特点、国民经济总体的发展和需要、当前与长远利益的兼顾、理论与实践密切相结合。与此同时，从事这方面工作的研究者应与经济、社会、政府决策部门密切配合，积极参与国民经济建设， 不断探求具有中国特色的经济、社会、生态环境协调发展的途径，并建立一套生态建设和规划、管理的理论、方法和法规，以及适合于我国的实用生态工艺技术，真正求得社会、经济、生态三大效益的统一，并使我国生态建设、生态规划、生态管理提高到一个崭新的水平。城市生态管理是实施城市生态规划，搞好城市生态建设的重要保障。无数事实证明，如果只有建设没有管理，建设项目既不能充分发挥效率，也不能长期维持它的功能，有时甚至还可能产生负效应。

城市生态管理主要是对城市生态系统的结构、功能及协调度进行管理和调控。具体地说，就是要研究城市生态系统中的自然环境和人工环境的管理，以及规范人群的生态行为等，把这些组成成分科学地组织起来，把城市的物流、能流、信息流等有效地结合起来，充分发挥它们之间的协调作用，以达到城市生态系统的最佳效能。

城市生态管理的核心是研究怎样充分发挥人在城市生态系统管理中的主导作用。城市生态建设和生态评价要对城市生态管理内容及管理途径提供指导原则，反过来，在城市生态规划、生态建设和生态评价过程中也应该始终贯彻生态管理的原则，使它们密切结合起来以发挥生态管理在城市建设和发展中的作用。

第十章　资源生态学

资源生态学(resource ecology)是资源科学和生态学交叉而产生的一门应用性的边缘学科。20 世纪以来全球性资源问题和区域性资源问题的不断骤起是资源生态学产生的最大驱动力。可见，资源生态学是与人类的生存和发展关系最为密切的学科之一。一般而言，资源生态学的研究对象是资源生态系统，这个庞大而复杂的生态系统及其各种组分均按客观规律和生态学原理相互联系、相互制约着。只有准确地认识和把握资源生态系统的结构和功能，才有可能真正地使资源服务于人类，并减少其潜在的生态环境负效应。

第一节　资源生态学产生的背景与发展过程

生态学是一门从共性到个性、从一般到特殊的学科。这一特点决定了它具有无限的演绎力，辐射力很强。生态学可以覆盖人类与自然之基本关系这样一个深刻的哲学命题。生态学的衍生过程基本上是一个理论或原理的渗透和扩散过程。在生态学基本原理的指导下，在 20 世纪以来全球性资源问题和区域性资源问题不断骤起的情况下，资源生态学便应运而生。

一、资源生态学的产生背景

资源是人类赖以生存和发展的物质和能量基础。人类社会的发展史在某种意义上可以说是人类认识资源、开发利用资源的历史。资源生态学的产生与人类社会的发展密切相关。

1. 工业革命以前：人类与资源的“和平相处”

原始的人类社会经历了漫长的发展阶段。那时，由于各种条件的限制和约束，人口数量很少，人类认识资源和利用资源的能力也非常有限，人类对其周围的生物和环境的影响是局部的、微小的。人与自然的关系带有纯粹的“原始性”。

农业革命使人类的生产力水平逐渐提高，人类认识和改造自然的能力不断加强，人类开发利用资源的种类大幅度增加，需求规模也在扩大。随着生产的发展，世界上出现了一些文明古国。人类在长期的农业实践中积累了丰富的经验，产生了许多有关资源利用和保护的朴素而深邃的思想。在这一阶段，人类与资源的关系仍是“和平相处”。

2. 19 世纪中期到 20 世纪中期：人本位的资源无限史观

19 世纪中期的工业革命大大解放了生产力，促进了开矿、挖煤、采油、伐木、垦荒、捕捞等事业的发展，进而推动了科学进步。人类开发利用资源的深度和广度也达到了史无前例的地步。人类大规模开发资源的一个严重后果是人的生产、生活方式的循环周期与自然韵律及环境影响相隔离，循环和季节被淡忘。

这一时期，人类对自然界资源认识体系的主流具有明显的人本位特征：人类是自然的主人和占有者，自然界的--切必须服从于人类的利益和需求，人类对自然界拥有绝对的开发利用权。“一向发生的事情只是盲目地和浪费地开发矿产资源”，贝尔纳在《历史上的科学》中写道“在资本主义之下，只有对资源的无知才保护了资源，地球成了私产，可以不惜浪费，尽情开发”。在这时期“取之不尽，用之不竭”的思想较为普遍，在无限时空中，“人是万物的尺度与主宰，”随着人类及其创造的科技世界的无限发展，理性将成为万能的立法者。这种藐视大自然的宏大气魄、积极进取的能动精神，的确值得人类文明史大书特书。但由于当时科学技术水平的限制，直到 20 世纪 60 年代资源的稀缺性、有限性、整体性、系统性，人类活动对资源、环境的影响以及最终对人类的危害，还没有真正被人类所认识。“风物长宜放眼量”，人口剧增及大规模的破坏性开发和掠夺性利用如大炼钢铁运动、围湖造田、滥垦滥伐已给当前及 21 世纪的可持续发展带来了巨大的隐患。以人本主义思想为背景的现代人本位资源无限史观是一种伟大的气概，它的实践构建了整个现代文明，但也带来了今天人类面临的一系列以人口、资源、环境与发展关系为核心的全球性问题。

3. 20 世纪中期以来：“资源有限论”及其论战和可持续发展思想的启示

20 世纪中期由于人类对资源的大规模开发利用以及由此带来的一系列生态环境问题的出现，逐渐引起了人们的注意，人类开始意识到资源合理利用与有效保护的重要性。

1962 年美国生物学家 Carson 发表《寂静的春天》，全面阐述了空气、海洋、河流、土壤、动植物等自然资源的退化和环境污染与人类活动的关系，首先向人类敲响了资源环境危机的警钟。另两个有影响的研究是 1966 年 Boulding 的《来自地球宇宙飞船的经济学》和 1968 年 Ehrlieh 的《人口爆炸》，前者把地球比做茫茫天空中的一艘宇宙飞船，人口和经济的不断增长，将使飞船内有限的资源开发耗尽，人类生产和生活消费排放的废物充满船舱，最能导致整个人类社会的崩溃。后者则认为，人口增长再不控制，大约 900 年后，全球人口将达 6×10^{16}，地球陆面每平方米挤满 100 人，人类将无立足之地。中国学者马寅初早在 1957 年全国人民代表大会第四次会议上就发表《新人口论》，他指出中国确实存在着严峻的人口问题，“人多固然是一个极大的资源，但也是一个极大的负担”。

进入 20 世纪 70 年代以来，人类社会对人口、资源、环境与发展问题日益觉醒。1972 年第一颗地球资源卫星的发射成功，使人类可以从空中跨国界审视整个地球，“全球性问题”开始引人注目。人们开始谈论后工业文明，重新审视人与自然、人类与资源之间的相互关系。于 1968 年创建的罗马俱乐部首先对“全球性问题”进行了开拓性研

究，1972 年发表的报告《增长的极限》被认为是“资源有限论”和悲观派的代表作。该报告系统地考察了加速的工业化、快速的人口增长、普遍的营养不良、不可更新资源的枯竭、环境的加速恶化等全球性问题，以及它们在同一系统中的相互作用。认为：“如果在世界人口、工业化、污染、粮食生产和资源消耗方面现在的趋势继续下去的话，地球上的增长极限有朝一日将在今后 100 年内发生。”报告发表后的 1973~1974 年，石油危机暴发，许多地区发生饥荒，一时间引起了整个西方世界关于物质增长及其极限问题的讨论。《增长的极限》发表不久，阿姆斯特丹就出现了《反对罗马俱乐部》的著作，1976 年美国赫德森研究所发表了《下源》(中译本名为《没有极限的增长》)一书中也对罗马俱乐部的极限论提出了批评：从“无限的自然资源”到“永不枯竭的能源”，作者认为，“我们可以得到的自然资源的数量，以及更为重要的这种资源可能向我们提供的效用，是永远不可知的……”。人类资源没有尽头。“实际上，技术创造新的资源。…… 这就是人类不断繁衍增加，不断消费更多的资源，而资源贮备却不断增长的原因。”但是这些反对派并未否认罗马俱乐部提出的“全球性问题”的重要性和深刻性，也没能改变人类对“资源有限性”的认同。事实上，无论是《增长的极限》，还是《没有极限的增长》，都在向人类昭示：在一定时期内，由于种种因素的制约，可供人类利用的资源总是有限的。1972 年 6 月联合国在斯德哥尔摩召开第一次“人类环境会议”，发表了“人类环境宣言”，连同会前写成的《生存的蓝图》、《只有一个地球》和《增长的极限》，唤醒了人类从哲学和科学高度更加系统地认识人口、资源与环境问题。此后，1980 年 3 月世界自然保护联盟(IUCN)发表了《世界保护战略：可持续发展的生命资源保护》。1984 年世界环境与发展委员会成立，并在 1987 年发表了《我们共同的未来》，明确提出：“可持续发展：既满足当代人的需要，又不对后代人满足其需要的能力构成危害的发展。”1992 年联合国召开的“环境与发展大会”及会议通过的《21 世纪议程》，进一步确立了以资源可持续利用为核心的全球可持续发展观。

资源开发利用一方面带来了人类社会经济的不断发展，另一方面由于种种复杂的原因，与之相伴的是产生和加剧了一系列生态环境问题；反过来又制约着资源的开发和人类的发展。可以说，人类世界所取得的一切成就抑或人类社会所面临的一系列诸如人口、粮食、环境、污染等严重问题，都可以从资源问题中找到答案。20 世纪 70 年代以来，全球范围内有关资源有限与无限、资源利用与保护之间的任何学术流派之间的论争，归根到底也都是以人口、资源、环境与发展关系(PRED)为核心的。这既是自然科学问题，也是社会科学问题，更是哲学的根本问题。

事实一再证明，资源愈来愈明显地支撑着人类社会经济的发展，但同时也愈来愈明显地制约着人类社会的前进。显然，以资源开发利用为中心或对象，研究在资源开发利用过程中的生态环境问题及其与经济发展的关系，是现实的需要。因而，探讨资源的有关问题终于提上了时代日程，资源问题的不断骤起则是资源生态学产生的最大驱动力。另一方面，生态学理论用其深刻而博大的思想正在以高强的渗透势向其他应用学科渗透，新的边缘学科不断涌现。这样以来，生态学理论在向资源领域的渗透过程中也便孕育并诞生了资源生态学。

二、资源生态学的形成与发展

19 世纪下半叶生态学的发生发展，为资源科学的整体形成提供了契机。人们越来越认识到自然界的任何成分都不是孤立存在的，彼此相互联系、相互制约，构成具有一定结构和功能的系统。特别是 20 世纪 30 年代，有关生态系统、整体观和综合水平理论的广泛应用，促进了资源生态学的产生和发展。

“生物圈”早在 19 世纪末就出现在奥地利地质学家 Suess 的巨著《地球的面貌》中，直到 1926 年苏联 Вернапский 做了题为《生物圈》的演讲，才得到公认，成为食物生产、能源利用和资源开发所依赖的大系统概念。1935 年英国生态学家 Tansley 提出“生态系统”概念，明确地把有机体与它们生存的环境视为一个不可分割的自然整体，并引入热力学的能量循环思想对生态系统进行研究；英国学者 Lindeman1942 年发表“食物链”和“金字塔营养级”报告，提出“十分之一定律”，为研究人口、资源与环境的关系指出了新的综合方向，为资源生态学的发生发展奠定了理论基础。20 世纪 60 年代见之于文献的有《生态系统的概念在自然资源管理中的应用》(Dyne 1961)和《生态学和资源管理》(Wall 1968)，70 年代之后，随着生态科学的日益发达，《自然资源生态学》(Simmons 1974)、《自然资源保护——一种生态方法》(Oroen 1980)、《资源物理学》(槌田敦 1984)、《自然资源生态学》(Ramade 1984)相继出版。资源生态学研究领域日趋活跃。

资源生态学目前的研究主要集中于自然资源生态学领域的研究。国际自然保护同盟委员、法国生态学和动物学教授 Ramade 发表的《自然资源生态学》(Ecology of Natural Resources)，较为全面地阐述了自然资源开发、利用和保护中的生态学理论问题。国内也有这方面的研究。无疑，作为一门学科，资源生态学研究仍有待于深入。如何用生态学理论指导资源开发和利用是资源生态学的一个重要问题，但同样重要的是还需要从更加广泛的资源范畴来研究资源开发利用过程中的生态问题和生态学理论。

三、资源生态学应用前景

1. 制定国土规划和区域开发规划

资源生态学是研究资源综合开发及生态环境变化规律的一门科学。它不仅涉及自然资源系统，而且也与社会经济系统密切相关，因此，它的基本理论和方法可广泛地应用于国土规划和区域发展规划。制定一个地区的综合发展规划，首先要对该区自然资源系统和社会经济系统进行全面而系统的分析，在判定优势资源和资源利用存在问题的基础上，提出该区域资源开发和经济发展的总体战略，进而对产业结构进行调整，制定各产业发展规划，最后提出一批优先发展的重点项目，为区域发展提供可靠依据。

2. 指导贫困地区发展

贫困是一个综合症。它是某些恶劣的自然条件和落后的或发育不良的社会经济条件经过漫长的历史沉积而形成的社会现实。总体看，贫困地区的资源是匮乏的；某些自然资源具有丰富的一面，但有些自然资源又具有限制性一面；资源的总体组合不佳。因

此，贫困地区的发展实际上就是在充分利用和开发优势资源及保护和治理恶劣自然生态环境的基础上实现社会、经济与生态的持续稳定的发展。过去在贫困地区推行的为生态而生态的做法与贫困地区的实际发展要求相距甚远，效果不佳。可见，贫困地区发展需要重视生态与经济的协调发展。这方面，资源生态学是大有可为的。

3. 指导现代化农业建设

中国农业要现代化，是国内科学界和决策界的共识。但对现代化农业的内涵外延及形态等问题的认识仍然有不同的理解和认识。各种农业概念争奇斗艳，初步统计大约有70 多种不同提法。影响较大的诸如生态农业、旱地农业(雨养农业)、有机农业、精久农业、持久农业、“两高一优”农业等等。综合分析不同概念的农业，其共同之处在于基本都是遵循我国或不同区域农业资源实际状况而提出的，或者是按照农业发展目标及建立良性循环的农业生态经济系统而提出的。这里，涉及对农业资源的合理开发、综合利用，涉及大农业建设不仅要求建立一个优化的农业自然资源生态系统，更要求大力开发农业社会经济资源(人力资本资源、技术资源、资金资源等)和现代资源要素。因此，资源生态学在我国农业现代化过程中有着广泛的应用前景。

4. 制定正确的资源生态环境战略决策

在对待日益严重的全球性生态环境问题上，国际国内学术界存在着一股自然生态主义的思潮，影响甚广。自然生态主义认为原始状态的自然生态最好，反对人类对自然生态系统的任何干预，反对或否定工业化、主张停止经济发展，甚至对人类在地球上的出现也认为是罪过。这些思潮在一定程度上影响了对全球生态环境问题的正确决策。中国是发展中国家，实现经济社会的快速、持续、稳定发展是压倒一切的头等大事。经济能否发展，关系中国命运与前途。那么，如何正确认识并解决中国经济发展过程中所出现的生态环境问题，进而建立符合中国实际情况的生态战略。这里，需要从中国生态经济系统的高度分析、资源及其过程特点，分析资源过程与生态环境产生演化的关系，研究资源开发过程中经济与生态代价及其阈值范围，预测不同社会经济资源作用于某种自然资源时可能产生的生态环境效应及问题类型、性质等。这些基于客观的科学研究不同于自然生态主义的某种哲学思想及主张，它是制定正确的生态环境决策的可靠理论依据。 以上这些涉及中国生态环境战略研究的理论问题都是资源生态学要研究的主要内容。

第二节　资源的涵义

资源是人类社会生存与发展的最基本的物质基础。一部人类社会发展史，就是人类不断认识资源、萃取资源的历史。人类社会的每一重大进步，都紧紧伴随着对资源认识和开发、利用的革命性变化。显然，资源是相对于人类而言的，依人类存在而存在，依人类发展而发展。资源与人类的这种依附关系对于讨论资源生态学是非常重要的。

关于“资源”的概念，至今还没有严格的、明确的、公认的定义，从词义上看，中

文里的“资源”是指“资财的来源”。《辞海》对“资源”的解释是“资财之源，一般指天然的财源”。英文里的“资源”一词为 resource，它是由 re 和 source 组成，前缀 re 含有“再”的意思，source 表示来源；俄文里的“资源”一词为 ресурсы，也是指“财富的来源”。可见，“资源”一词在不同民族语言中的词义是很相近的。

但由于人们的研究领域和研究角度存在着差别，因此在资源的概念上存在着各种不同的理解。资源通常有广义、狭义之分。

广义的资源指人类生存发展和享受所需要的一切物质的和非物质的要素。也就是说，在自然界及人类社会中，有用物即资源，无用物即非资源。因此，资源既包括一切为人类所需要的自然物，如阳光、空气、水、矿产、土壤、植物及动物等等，也包括以人类劳动产品形式出现的一切有用物，如各种房屋、设备、其他消费性商品及生产资料性商品，还包括无形的资财，如信息、知识和技术，以及人类本身的体力和智力。关于广义资源的概念，历史上早有一些间接的论述，英国的威廉·配第曾经指出“土地是财富之母，劳动是财富之父”。马克思在论述资本主义剩余价值的产生时指出：“劳动力和土地是形成财富的两个原始要素，是一切财富的源泉。”恩格斯则进一步明确提出：“其实劳动和自然界一起才是一切财富的源泉。自然界为劳动提供材料，劳动把材料变为财富。”马克思和恩格斯虽然没有给资源下定义，但已经把劳动力和土地、劳动和自然界肯定为形成财富的源泉。这种论述和我们现代人的理解是非常接近的。因此人类社会财富的创造不仅来源于自然界，而且还来源于人类社会，资源不仅包括物质的要素，也包括非物质的要素。

狭义的资源仅指自然资源，联合国环境规划署(UNEP)对资源下过这样的定义：“所谓自然资源，是指在一定时间、地点的条件下能够产生经济价值的、以提高人类当前和将来福利的自然环境因素和条件的总称。”这是一种狭义资源的定义，仅指自然资源，而且还排除了那些目前进行开采、在经济上还不合算，但在技术上能够加以开采的那部分矿产资源，以及目前无法开垦利用，但却有观赏、探险猎奇、考察研究等功能，能作为旅游资源的沙漠、冰雪覆盖地等等。

目前，在“资源”这一概念的解释和使用上，大体存在以下几种情况：

1) 把资源当作广义的资源。认为资源不仅包括自然资源，还包括社会资源。这一理解在资源经济学及生态经济学中被普遍运用。因为仅将资源理解为自然资源或社会经济资源难于解释社会、经济和生态环境如何实现协调发展的很多基本理论和实际问题，只有使这两大类资源实现合理组合和优化配置，才能最终实现资源生态经济的协调发展。

2) 把资源当作自然资源的代名词。美国经济学家阿兰·兰德尔说：“资源是人们发现的有用途和有价值的物质”。其实，他的著作所探讨的通篇都是自然资源，我国不少的著作，书名上标的是“资源”，而实际上论述的则是自然资源，有的权威性辞书，把“资源”条目解释为“生产资料或生活资料的天然来源”，显然，指的也是自然资源。在许多场合下，谈论某一国家具有资源优势，或某一地区属于资源丰富地区等问题时，所指的实际上也是自然资源。

3) 把资源当作生产资源。西方经济学家赫帝认为资源与生产要素同义，是指使用于生产过程中的任何原动力。可见，在这里所谈的实际上是生产资源，现代西方微观经

济学，尤其是“帕累托最适度”状态理论，正是研究生产资源的配置效率最大问题。

4) 把资源等同于产品即原料。社会上通常所说的资源或自然资源，很多时候指的实际上是资源产品，即原料。

总之，资源是一个有广泛意义的词汇。那么，该如何理解它的含义呢?

我们理解资源的含义有两层含义，首先，资源必须具有社会性开发利用价值，即具有社会化的效用性。联合国环境规划署(UNEP)定义：“所谓自然资源，是指在一定时间、地点的条件下能够产生经济价值的、以提高人类当前和将来福利的自然环境因素和条件的总称。”这时对人类的效用，也就是社会性效用，资源就是这样一开始便与人口问题联系在一起的。对于人文性质的资源，更是具有直接而普遍的社会有效性，比如劳动力和资金是构成经济活动的两大基本要素，可以说是经济效用的代名词；又比如文化古迹资源，其主要效用是社会和心理，同时也具有发展旅游业的经济价值。其次，资源具有相对稀缺性，这是资源与人口必然联系的另一个侧面。阳光与空气这类事物虽然对人类具有极重要的社会效用，但人们并不视其为资源，这是因为与人类的需求相比，它们的供给是充分的，只有在某些特殊情况下，才表现出相对的稀缺或潜在的限制性，并被视为资源，比如阳光作为太阳能开发或日光被利用时就显示出相对稀缺性。必须注意，资源是个历史的范畴，又是社会的产物。它的内涵与外延并非是一成不变的，它随着技术经济的提高而不断扩展、深化。

因此，我们可以把资源的概念归结为：在一定历史条件下能被人类开发利用以提高自己福利或生存能力的、具有某种稀缺性的、受社会约束的各种环境要素或事物的总称。资源的根本性质是社会化的效用性和对于人类的相对稀缺性，而两者均依人类的需要而成立，从而构成人口与资源这一对地理学的重要范畴。

第三节　资源的分类

对于资源，从不同的角度、标准有着各种各样的分类方法。例如，按照生产要素的实物形态，可以划分为人力资源和物质资源；按照投入生产与否，可以划分为在用资源和待用资源；按照其来自地区，可以划分为国内资源和国外资源；按照资源的用途不同，可划分为生产资源和生活资源，也可分为农业资源、工业资源、服务性资源等等。而且资源的划分还可以层层细分，例如，资源可划分为自然资源和社会资源，其中自然资源可划分为可再生资源和不可再生资源，而其中的可再生资源还可划分为动物资源和植物资源……通常我们将资源分成以下几类：① 按资源的根本属性的不同，划分为自然资源和社会资源；② 按利用限度划分为可再生资源和不可再生资源；③ 按其性能和作用的特点，划分为硬资源和软资源。

一、自然资源和社会资源

(一) 自 然 资 源

1. 自然资源的概念

自然资源是指具有社会有效性和相对稀缺性的自然物质或自然环境的总称。联合国出版的文献中对自然资源的涵义解释为:“人在其自然环境中发现的各种成分，只要它能以任何方式为人类提供福利的都属于自然资源。从广义上来说，自然资源包括全球范围内的一切要素，它既包括过去进化阶段中无生命的物理成分，如矿物，又包括地球演化和化石资源等。”自然资源是一个相对概念，随着社会生产力水平的提高和科学技术的进步，先前尚不知其用途的自然物质逐渐被人类发现和利用，自然资源的种类日益增多， 自然资源的概念出现不断深化和发展。在国土开发利用中自然资源包括土地资源、气候资源、 水资源、生物资源、矿产资源、海洋资源、能源资源、旅游资源等。

1) 土地资源。土地是地球陆地表面部分，是人类生活和生产活动的主要空间场所，“土地包含地球特定地域表面及其以上和以下的大气、土壤及基础地质、水文和植被， 它还包含这一地域范围过去和目前的人类活动的种种结果，以及动物就它们对目前和未来人类利用土地所施加的重要影响”。土地是由地形、土壤、植被、岩石、水文和气候等因素组成的一个独立的自然综合体。土地资源数量有限，位置固定，随着生产和科学技术的发展，人类影响的程度越来越大，对土地资源的重要性也越来越为人们所认识。土地的分类方法很多，比较普遍的是采用地形分类和按利用类型分类；按地形分为山地、高原、丘陵、平原、盆地等，按利用类型分，一般分为耕地、林地、草地、宜垦荒地、宜林荒地、沼泽滩涂水域、工矿交通城镇用地、沙漠石头山地、永久积雪冰川等。

2) 气候资源。气候资源是指地球上生命赖以产生、存在和发展的基本条件，也是人类生存和发展工农业生产的物质和能源。气候资源包括太阳辐射、热量、降水、空气及其运动等要素。太阳辐射是地球上一切生物代谢活动的能量源泉，也是气候发展变化的动力。降水是地球上水循环的核心环节，是生命活动和自然界水分消耗的补给源。空气运动不仅可以调节和输送水资源，而且可将大气的各种组成部分不断输送扩散，供给生命物质的需要。

3) 水资源。水资源是指在目前技术和经济条件下，比较容易被人类利用的补给条件好的那部分淡水量，水资源包括湖泊淡水、土壤水、大气水和河川等淡水量。随着科学技术的发展，海水淡化前景广阔，因此，从广义上讲，海水也应算水资源。

4) 生物资源。生物资源是指生物圈中全部动物、植物和微生物。生物资源的分类也是各种各样的，通常采用生物分类的传统体系，将生物资源分为植物资源和动物资源，在植物资源中又可以群落的生态外貌特征划分为森林资源、草原资源、荒漠资源和沼泽资源等；动物资源按其类群可分哺乳动物类资源、鸟类资源、爬行类资源、两栖类动物资源以及鱼类资源等等。

5) 矿产资源。经过一定的地质过程形成的，贮存于地壳内或地壳上的固态、液态

或气态物质，当它们达到工业利用的要求时，称之为矿产资源。其分类方法较多，一般多按矿物不同物理性质和用途划分为黑色金属、有色金属、冶金辅助原料、燃料、化工原料、建筑材料、特种非金属、稀土稀有分散元素等 8 类。

6) 能源资源。能够提供某种形式能量的物质或物质的运动都可以称为能源。大自然赋予我们多种多样的能源，一是来自太阳的能量，除辐射能外，还有经其转换的多种形式的能源；二是来自地球本身的能量，如热能和电子能；三是来自地球与其他天体相互作用所产生的能量，如潮汐能。能源有多种分类形式，一般可分为常规能源和新能源， 常规能源指当前已被人类社会广泛利用的能源，如石油、煤炭等；新能源是指在当前技术和经济条件下，尚未被人类广泛大量利用，但已经或即将被利用的能源，如太阳能、地热、潮汐能等。

7) 海洋资源。海洋资源是指其来源、开发和存在方式都直接与海水有关的物质和能量。可分为海洋生物资源、海底矿产资源、海水化学资源和海洋动力资源。海洋生物资源包括生长和繁衍在海水中的一切有生命的动物和能进行光合作用的植物。海底矿产资源主要包括滨海砂矿、陆架油气和深海沉积矿床等。海水化学资源包括海水中所含大量化学物质和淡水。海洋动力资源主要指海洋里的波浪、海流、潮汐、温度差、密度差、压力差等所蕴蓄着巨大的能量。

8) 旅游资源。旅游资源是指能为旅游者提供游览、观赏、知识、乐趣、度假、疗养、 休息、探险猎奇、考察研究及友好往来的客体和劳务。人们在旅行中所感兴趣的各类事物，如国情民风、山川风光、历史文化和各种物产等，均属旅游资源。旅游资源可分为自然旅游资源和人文旅游资源两大类。自然旅游资源指的是大自然造化出来的各种特殊的地理地质环境、景观和自然现象。人文旅游资源是在人类社会中形成的各种具有鲜明个性特征的社会文化景观。

2. 自然资源的特点

(1) 有限性。

有限性是自然资源最本质的特征。资源的有限性存在着两个方面的含义：第一，任何资源在数量上是有限的。资源的有限性在矿产资源中尤其明显，按美国学者梅多斯于 1974 年的计算，全世界的金银最多可采 20 年；石油、汞、铜、铝可开采 40 年；天然气可开采 60 年；镍可开采 75 年；锌、锰、铁、煤可开采 100 年。根据最近的测算，石油资源最多可采 30 年，由于任何一种矿物的形成不仅需要有特定的地质条件，还必须经过千百万年、上亿年漫长的物理、化学、生物作用过程，因此相对于人类而言是不可再生的，消耗一点就少一点。其他的可再生资源如动物、植物，由于其再生能力受自身遗传因素的制约，受外界客观条件的限制，不仅其再生能力是有限的，而且利用过度，使其稳定的结构破坏后就会丧失再生能力，成为非再生性资源。与其他有限资源相比，太阳能、潮汐能、风能等这些恒定性资源似乎是取之不尽、用之不竭的，但从某个时段或地区来考虑，所能提供的能量也是有限的。第二，可替代资源的品种也是有限的。煤、 石油、天然气和水力、风力等资源都可用于发电，但总的来看，可替代的投入类型是有限的。例如，温室技术可替代土地资源而生产粮食，空间的利用可以替代工业及

住宅用地的不足，但作为人类生存必须具有的淡水和氧气至今还没有找到可以替代的资源。

在如何看待资源的有限性方面，人们有不同的看法。持乐观态度的人认为，人类在今后的生产实践中会依靠科学发展和技术发明，不断发掘出新的资源或新的替代资源，也会开发出依靠过去的技术所不能够开发的一些储量丰富的资源。因此，人类的前途是无限光明的，人们不必因暂时资源短缺而杞人忧天。持悲观看法的人认为，造成现代资源危机的根源是一种积极的根源，是人类为了自身利益的结果，这次危机威胁到人类自身文明是否能继续存在和维持下去，迫使人类不得不在短期繁荣与长期生存之间做出艰难的抉择，虽然科学技术能使人类发掘出新的资源，但不能完全解决资源危机问题，由于资源的有限性在本质上是无法改变的，因此，人类的前途无疑是悲观的。

以上的观点都有一定的片面性，由于资源开发利用的潜力是无限的，任何物质都是不断循环运动、不断更新发展的，因此都可以不断重复利用。而且人类科学技术的发展也是无限的，人类能够依靠迅速发展的科学技术避免资源有限所带来的问题。但是，如果因此而对资源危机无动于衷，则是过于乐观。由于不同资源其更新能力不同，更新所需要的周期也不同，如果不合理的开发利用，对它的消耗超过它的更新能力和更新速度，资源就得不到恢复而受到破坏，直至从地球上消失。

资源的有限性要求人类在开发利用自然资源时必须从长计议，珍惜一切自然资源，注意合理开发利用与保护，决不能只顾眼前利益，掠夺式开发资源，甚至肆意破坏资源。

(2) 区域性。

区域性是指资源分布的不平衡，存在数量或质量上的显著地域差异，并有其特殊分布规律。自然资源的地域分布受太阳辐射、大气环流、地质构造和地表形态结构等因素的影响，因此，其种类特性、数量多寡、质量优劣都具有明显的区域差异，分布也不均匀，又由于影响自然资源地域分布的因素基本上是恒定的，在特定条件下必定会形成和分布着相应的自然资源区域，所以自然资源的区域分布也有一定的规律性。例如我国山西省煤炭资源的探明储量占全国总储量的 27%以上，人们把山西比做“煤海”；长白山区林地面积和木材蓄积量分别占全国的 11%和 13.8%，人们把长白山比做“林海”。我国水资源南多北少；能源资源南少北多；水能集中在川、滇、黔、桂、藏五个省区；金属矿产资源基本上分布在由西部高原到东部山地丘陵的过渡地带。从世界范围来看，资源的分布也是不均匀的，探明储量约占世界总储量的 58%的石油，集中在波斯湾石油沉积盆地，全世界煤炭总量的 87%分布在美、中和前苏联三大国或地区；再例如，随着太阳辐射热量在地球表面的纬度带递变规律，从赤道向极地依次为雨林、季雨林、常绿林、落叶阔叶林、针叶林和苔原等；随着水分循环的地域差别，从沿海向内陆分别为森林、森林草原、草原、荒漠等。

自然资源区域性的特点要求人类在开发利用资源方面应以因地制宜为原则，充分考虑区域、自然环境和社会经济特点，才能使自然资源的开发利用和保护兼有经济效益、环境效益和社会效益，为人类造福。

(3) 整体性。

整体性是指每个地区的自然资源要素彼此有生态的联系，形成一个整体，触动其中一个要素，可能引起一连串的连锁反应，从而影响到整个自然资源系统的变化。这种整体性，再生资源表现得尤为突出。例如，森林资源除经济效益外，还具有含蓄水分、保持土壤的环境效益，如果森林资源遭到破坏，不仅会导致河流含沙量的增加，引起洪水泛滥，而且使土壤肥力下降，土壤肥力的下降又进一步促使植被退化，甚至沙漠化，从而又将使动物和微生物大量减少。相反，如果在沙漠地区通过种草种树慢慢恢复茂密的植被，水土将得以保持，动物和微生物将集结繁衍，土壤肥力将会逐步提高，从而促进植被进一步优化及各种生物进人良性循环。总之，各种资源在不同时间、空间条件下，是按不同的比例、不同的关系联系在一起的。形成不同的组合结构，并构成不同的生态系统。

自然资源的整体性要求对自然资源必须进行综合研究和综合开发。

(4) 多用性。

多用性是指任何一种自然资源都有多种用途，如土地资源既可用于农业，也可用于工业、交通、旅游以及改善居民的生活环境等，同一种资源可以作为不同生产过程的投人因素，不同的行业对同一种资源存在着投人需求；同一行业的不同部门以及同一部分的不同经济单位，甚至于同一经济单位的不同企业或同一企业的不同车间、班组或工序都会同时存在着对同一种资源(如电力)的需求。自然资源的多用性只是为人类利用资源提供了不同用途的可能性，到底采取何种方式来利用则是社会、经济、科学技术以及环境保护等许多因素决定的。

资源的多用性要求对资源开发利用时，必须根据其可供利用的广度和深度，实行综合开发、综合利用和综合治理，以做到物尽其用，取得最佳效益。

(二) 社 会 资 源

1. 社会资源的概念

社会资源是指自然资源以外的其他所有资源的总称，它是人类劳动的产物。社会资源包括人力资源、智力资源、信息资源、技术资源、管理资源。

1) 人力资源。人力资源以人口为自然基础，指人口中那些已经成年并且具有和保持着正常劳动力的人，它是由一定数量的具有劳动技能的劳动者构成的。人力资源的质和量的规定性包括两个方面：一是作为劳动者的人的数量，二是劳动者的素质。一定数量的人力资源是社会生产的必要的先决条件，但经济的发展主要靠人口素质的提高，人力资源的质量在经济发展中将起到越来越重要的作用。

2) 智力资源。智力资源是近年来一些学者提出的一个新观念。他们认为在以物质形态存在的资源(第一资源)和知识形态(知识资源或称第二资源)之外，国家还拥有一种“智力资源”。智力资源主要指开发创造知识资源、开发利用物质资源的科技队伍和管理队伍。

3) 信息资源。信息资源是指可供利用并产生效益的一切信息的总称，是一种非实

体性、无形的资源，普遍存在于自然界、人类社会和人类的思维领域之中。随着人类社会的发展，面对新的技术革命，社会将从工业化社会转入信息社会(或称知识、智力社会)。信息作为一种重要的资源，对促进现代社会生产和科技发展以及人类的认识论过程有着极其重要的意义。现代工业社会正面临一场以扩展和延长人类信息功能为目标，以信息化、智能化、综合化为特征的信息革命，利用现代信息科学和信息技术对信息进行获取、传递、交换、存储、检索、更新、处理、分析、识别、判断、提取和应用，是信息资源开发、管理和利用的主要内容。信息资源可分为数量信息及质量信息，直接信息及间接信息。信息资源还有其他分类方法。

4) 技术资源。技术资源是指人们可用于创造社会财富的各种现实技术和潜在技术。现代科学技术已成为推动生产力发展的第一要素资源，也是实现资源生态经济发展的第一要素资源。

5) 管理资源。是指管理在经济增长与社会发展过程中所起作用的比喻，当与人力、物力、财力等资源相结合，将显示其重要作用。因此，它是与人力资源、物力资源、财力资源并列的一种资源。

2. 社会资源的特点

1) 易变性。易变性是社会资源最大的特征。社会资源不像自然资源那样相对稳定，由于受不同历史时期生产关系和生产力发展水平的影响，社会资源容易变化，在人类不断创新、扩展科学技术知识、劳动技能、生产科研设备和经营管理技术及各种经济技术信息的情况下，使各种社会资源也得以更新和扩展，而且更新的速度较快、周期较短。通常对社会资源的改造也较自然资源容易得多。

2) 不平衡性。社会资源发展和分布上的不平衡性是由自然资源分布的不平衡性，政治、经济发展的不平衡性，以及投资、资金分布的不平衡性，政治、经济发展的不平衡性，以及投资政策、资金政策、教育政策、科学技术政策、产业政策、经济管理体制、经营管理方式等因素直接或间接影响决定的。在经济技术基础较好的地区，经济资源、智力资源、信息资源、技术资源等相对较多，也较集中，反之则较少和分散。

3) 社会性。人类用以创造社会财富的劳动资源、智力资源、技术资源、经济资源和信息资源，无不是在一定的社会活动中才能造就出来的，一切社会资源都是社会劳动的产物，在各个不同的社会阶段，具有不同的种类、数量和质量的社会资源，而且不同的历史年代，不同的民族、文化，不同的外界条件，不同的社会活动方式，都会形成不同种类、数量、质量的社会资源。社会资源的社会性还突出的表现在：它们没有疆界，不分民族种族，谁都可以掌握并用于创造新的社会财富。

4) 继承性。社会资源的不断积累、发展、壮大，一方面来源于人类在现实生活中对社会资源的不断更新、扩展，另一方面，也是更重要的一方面，是来源于前人已有社会资源的继承，一切发明创造不仅需要有现实生活、生产、科学实验上的丰富经验，更多的是在接受前人的经验教训和基本知识的基础上才能实现，没有这种继承，仅凭个人的实践，所能获得的知识和财富是极为有限的，甚至不足以使人类生存下去。例如，人类自从学会了劳动的技能，这种学会劳动的因子就通过遗传物质一代一代地传下来，同时人们在成长过程中，又通过学习，在获得前人已经积累起来的科学技术知识的基础之

上，去获得新的劳动技能和知识，进而不断创造新的知识和技能，使人类社会、经济不断发展，科学技术水平和文化生活水平不断提高。

二、可再生资源和不可再生资源

（一）可再生资源

可再生资源是指连续或往复供应的资源，包括：① 恒定性的环境资源，如太阳辐射能、风力、水力、海潮、径流、地热、温泉等；② 可循环再生的环境资源，如一个地区由光热、年降水量、年光照时间、年积温、年无霜期等构成的气候资源，及主要由年降水量决定的区域水资源和水能资源等等；③ 人类劳动的产物，包括人力资源、信息资源、技术资源等各种社会资源。以上资源都能连续或往复地供应人类的需要，因此都属于可再生资源。这类资源固然可以通过大自然和人类的劳动不断循环地得到开发利用。但如果在一定时期里耗用无度，就可能打断资源再生循环的“链条”，使其处于枯竭状态。如我国的森林砍伐和近海捕捞都曾有向大自然攫取过度的倾向，土地资源也存在滥用浪费现象。不同的可再生资源，其再生恢复的速度是不同的。如自然形成 1cm 厚的土壤腐殖层需要几百年，砍伐森林的恢复一般需要数十年到百余年。因此，对可再生资源的消耗速度应小于这类资源的再生恢复速度，同时，不断增加社会投入来加速其恢复和再生，以满足社会经济发展对资源不断增加的需求。目前，世界各国都面临着经济发展和资源短缺的矛盾，20 世纪 50 年代以来，迫于资源短缺的压力，世界上工业化国家为了摆脱困境，都把资源开发重点转移到再生资源综合利用上来，工业发达国家将再生资源综合利用与废弃物资源化视为“开发第二矿业”。大力推动再生资源综合利用工作，减少自然资源的浪费，无论从现实的经济稳定增长还是长期的社会可持续发展看，都将有利于妥善解决资源的短缺和经济发展需求之间的矛盾。

（二）不可再生资源

不可再生资源是指相对于人类的自身的再生产及人类的经济再生产的周期而言是不能再生的各种地质和半地质资源。地质资源有金属矿、非金属矿、核燃料、化石燃料等，它们的成矿周期往往以百万年计，除非从废物中回收，或者通过工程手段合成、制造，这些不可再生的自然资源将随着人们的消费而逐渐减少。土壤和地下水资源的形成周期虽然比较短些，但与人类消费的速度相比也是十分缓慢的，因此被称为半地质资源。对于不可再生的自然资源，应该根据节约和尽可能综合利用的原则，杜绝浪费和破坏，大多数矿产品可以回收利用，形成资源利用的闭合循环系统。而且随着科技发展和进步，可以扩大矿产资源可供利用的储量。如 1860 年时，铜的开采边界品位是 6%，以后由于科技的进步和采、选、冶技术水平的提高，铜的现今开采边界品位已下降到 0.25%，这就极大地扩展了铜矿资源的储量。也还有两种资源可以互相替代使用的情况，如石油资源是不可再生的，按现在耗用规模计算，世界现有石油储量只能保证 30

年持续生产的需要。因此目前已有一些国家，正在试验用酒精替代汽油，或从树木中提炼燃油，以缓和石油资源的供需矛盾。“不可再生资源”只是一个相对的概念，并不是一个绝对的概念，因为地质资源是在漫长的地质年代中形成的，它本身是可以再生产出来的，只不过各种地质资源的富集程度、质量好坏、分布特点及诸矿之间的组合关系往往是受以地质年代为周期的漫长的自然再生产过程制约的，我们常说某些矿产资源是不可再生的，是指具有一定富集程度的某些矿藏相对于人类再生产和经济再生产的周期和时间而论，往往是不可再生的。

三、软资源和硬资源

在王铮等人所著的《理论地理学纲要》中，提出了软资源与硬资源的新分类体系。所谓硬资源是指主要在量上，或归根结底表现为量上的稀缺性的资源，比如土地、矿产、劳动力、资本等等。所谓软资源是指主要在质上表现出稀缺性，而量不可度的软件型资源，如技术、市场、信息、区位等。

(一) 硬 资 源

硬资源按其量的稀缺特征又可分为两类。第一类硬资源是储量有限的资源，对于自然资源来说，它相当于耗竭性资源(exhaustible)，对于人文资源，这种储量消耗主要表现为被占用，比如劳动力和资本的占用。这类资源又分为可更新资源和不可更新资源两型。可更新资源处在快速的自发的循环过程中，其循环速度接近或大于人们的开发利用速度，比如生物资源和劳动力资源。不可更新资源处于相对稳定状态或虽有循环但其速度远逊于人类的开发利用速度，比如矿产资源、水资源等等。显然可更新与不可更新的界限很大程度上取决于人类的开发利用能力和时空尺度。在大陆上，水资源的消耗基本是不可更新的，但全球水循环使之更新。

第二类硬资源是容量有限的资源，如土地、旅游景观、交通网等它们可以重复利用，因而也可称之为可重复利用资源(reusable)，这类资源的重复利用需要有一定的时间周期，比如农业对土地的利用以年或季为周期，旅游资源的利用周期相当于游客的平均观光时间，交通网的利用周期与交通工具的速度呈倒数关系，因此这种资源的稀缺性往往表现在“等待容量空出”方面。第二类硬资源也可分为两型，其一是承载性资源，比如土地、交通网等，其容量可用每单位当量的承载能力或服务能力来衡量，当然承载能力与承载内容及承载方式有关，因而称为各种专门的容量，比如土地的人口容量、环境容量、交通网的客货容量(通过能力)等。另一型是条件性资源，它们作为某种优越条件而表现出资源的特点，如气候资源、风景资源等，它们提供了某种有效性或有利条件而且表现出相对稀缺性。这种资源的容量与环境的稳定性有关，当环境属性未遭破坏时，它的可占用量可达到充分大，即容量充分大(但不是无限大)，而过度开发会导致稳定性破坏，使容量收缩。条件性资源有时不用容量来度量，而用单位潜力来衡量，例如可用农作物的单位潜力表示气候资源的综合优势度。

第一类硬资源与第二类硬资源对有效性和稀缺性的意义不尽一致。一般地讲，第一

类硬资源的社会有效性是第一位的，是内禀的，推动开发利用的主要原因是它的内在效用，这种内禀有效性也称之为功能性。第二类硬资源通常构成某种特定环境，其相对稀缺性是第一位的，有效性是在稀缺性突出的条件下才突出出来的，如旅游环境、气候环境、交通环境等都是在相对稀缺的情况下，我们才珍视其有效性的，我们称这一特性为优效性。功能性和优效性是第一类硬资源与第二类硬资源的一个重要的性质差别。

两类硬资源的另一重要区别表现在它们的空间可移动性方面。第一类硬资源是各种具体物质，在空间上的富集程度差异较大，而它们的社会有效性往往要到加工地点或消费者手中才能体现，因此具有可移动性，甚至位移是必须的。第二类硬资源一般表现为某种宏观环境，它们对地理空间有着极强的“附着性”或者其效用往往依既定区位而存在，因而具有不可移动性。

两类硬资源的上述两方面差别，导出了地理学中关于资源开发的两种著名的区位理论。功能性和可移动性的第一类硬资源是指向产业的，即资源优势产生产业优势从而争夺市场，形成帕兰德区位，即市场区位；优效性和不可移动性的第二类硬资源是指向市场的，即资源优势产生市场优势从而诱发产业配置，形成杜能区位，即孤立国区位。对某些第一类硬资源来说，如果可移动性并不意味着必须移动，这时资源的区位效应往往也表现出杜能型。例如煤炭资源开发引致坑口电站的建设，从而形成能源优势的市场区位，导致耗能产业围绕电站布局。但这种区位效应也可视为帕兰德区位的一种特例，因为上述情况一般仅见于煤矿邻近地区，不存在其他能源资源的有力竞争，而这种竞争一旦出现，将导致电站与“坑口”的偏离，从而构成一般意义的帕兰德区位。

（二）软　资　源

软资源也可分为三类。第一类是作为生产要素，具有“传染扩散”性能的信息和技术类资源；第二类是作为经济活动外部“软环境”，附着于地理空间的区位和市场类资源；第三类是文化。

软资源不可作本质上的量化，尽管可对它的载体、信息及空间形态特征作量测，但这种量测由于缺少物质能量内涵，因而不具有资源意义。

软资源的不可量化性，使资源占有者之间形成编序关系，即可以排序却不可量化的关系。比如工厂布局时，我们可以按区位优劣进行厂址比较，说 A 址优于 B 址，B 址优于 C 址，但是我们无法量测 A 址比 B 址或 B 址比 C 址的区位优多少。又比如某厂在建厂之初对市场信息的了解要少于投产以后，但我们不能谈论工厂早期占有的信息比后期究竟少多少。如果甲厂和乙厂了解到同样的信息，也不能说占有同样多的信息，因为对信息的理解能力和理解方式因人而异。当甲、乙两厂各自掌握了对方所不了解的信息时，甚至排序也是困难的。

信息和技术类资源有四个重要特点。第一是载体依附性，信息和技术是非物质形态的资源，必须依存于特定的载体，如书籍、磁盘、大脑等，其中大脑是最重要、最特殊的载体，就资源意义上说，任何信息和技术只有转入大脑，才能被转化为有效资源。第二是非消耗性，一个技术不会因为被使用了就消耗了，它们有用过与没用过之分，而无

用完与没用完之别。有些技艺也会失传，但这不是因为被利用而“消耗”了，而是随着载体的消失而消失了。第三是可传染性，信息和技术资源对于载体不具有排他性，载体可以通过相互“学习”、“拷贝”来获取新的资源，这种“学习”和“拷贝”过程是载体的被感染，而不是信息本身的增殖，被“感染”的载体数的增加，也并不意味着各载体获得的“信息量”的减少，因此信息和技术资源的传播结果是共享而不是瓜分。当然，信息和技术在传播过程中发生损耗和变质，这是传播介质的问题，不是资源本身的信息。第四是时效性，一项技术或一条信息往往只在特定时期内有效，例如关于服装流行款式的信息，往往只在当年甚至当季有效，生产厂家掌握了这一信息，就可能在当年大获利益，但到第二年这一信息就自行失效。时效性是信息和技术类软资源表现出稀缺性的最重要内因，如果只有可传染性和非消耗性，那么信息和技术就不成其为资源，而是比阳光、空气更为一般的普遍现象。时效性标定了信息和技术资源的“市场价格”，而时效之长短往往与其传播速度和范围有关，一项新的发明传播越广，其“市场价格”越低，因此，这类资源的持有者往往限制其扩散，控制稀缺水平来维持“高价格”水平。

在信息和技术资源的占有者的编序关系中存在一个临界点，编序于临界点以上的资源占有，并不一定增加资源的有效性，例如生产汽车的厂家了解到汽车的市场行情和消费心理时，也就获得了足够的信息，现在它又了解到某种钢精锅将行销市场，信息量增加了，但这个厂并不会因此而可在市场上领先一步，资源的有效性并未增加。

信息资源与技术资源也有不同的特点，区别包括：① 技术资源主要赋存于劳动力资源，而信息资源具多种赋存形式；② 信息资源的时效周期一般要短于技术资源；③ 信息资源一般不可替代，而技术资源具有很强的内部替代性。

区位和市场是两种特殊的软资源。区位的有效性在于它能够提高资源开发和经济运行的效率，在特定地区的“资源总效用”中，区位资源的效用并不是作为总效用的组成部分，而是作为总效用的“乘数因子”。市场资源的有效性在于它能够拉动经济发展，指引资源开发方向，是经济活动的定向引力因子，是“吃进”其他资源的一种“负资源”。

区位的稀缺性起因于它对空间(或土地)的附着性，每个具体的空间单元在特定时期只能有一种利用方式，相应的区位也只能由该种用途占据，土地的有限性决定了区位资源的稀缺性，况且产业活动的优势区位只分布于地表某些“极化”地点或地带，如沿海、沿河、沿路地带、城市地区等，因此经济行动总是表现出“区位饥饿”。与此相反，市场的稀缺在于它的“饱和”，一个“饱和”的市场，“吃不进”新的资源。区位与市场的一个特性是它是作为硬资源的对偶而存在的，经济活动“从硬资源身上抽了根骨头而创造了区位与市场”，既是硬资源的衍生物又是具有活化硬资源意义的对偶。

当然，在地理学中，区位和市场更多的是作为区域问题来讨论的，但这并不排除它们的资源特性。

第四节　资源生态学的研究对象、内容和学科性质

资源生态学学科体系的建立并不是也不能是生态学或资源科学的理论体系的机械移植，而应该是在继承并借鉴生态学基本理论的基础上，根据研究对象即资源的特性和运动机理来建构自身的合乎生态逻辑的理论体系。

一、资源生态学的研究对象

资源是一个与人类生存发展密切相关的概念。从不同的角度，资源有不同的分类。按资源根本属性的不同，可划分为自然资源和社会资源。自然资源是指自然界中客观存在的，一切可被人类利用的物质和能量的总称。社会资源则是指社会经济系统中人类可运用的，并能提高生产力水平的一切社会经济因素，它是人类劳动的产物，包括资本、人力、技术、信息、管理资源等。资源的开发利用过程实际上是人类利用现有的社会资源对自然资源的加工利用过程，人类利用社会资源的现状在一定程度上直接决定了人类对自然资源利用和改造的深度和广度及其效果。人类一旦开发利用自然资源，就会将自然资源引入社会经济系统，这样它便和其他社会经济资源一起组成了一个复杂的动态的过程系统，如果把人类作为一种生物有机体，那么这一系统就是资源生态系统。资源生态学的研究对象就是资源生态系统，也就是研究资源的开发、利用、保护和管理的生态过程，以使资源发挥其更大的效用，并尽可能减少其负效应。

资源生态系统以一定地域资源的质、量特征和时空规律性为前提，以各类资源系统为对象，从整体性和资源的有效与稀缺性出发，重点进行资源生态系统的结构与功能分析，包括一定资源系统的整体效应和一定地域系统的连锁反应研究。资源生态系统的整体研究以整体观和系统方法为基础，把生态学规律作为基础理论，以生态学方法为基本方法，试图寻求系统中不同层次的组织原理，以求结构与功能协调，人为控制资源系统向有利于人类方向平衡发展。这对资源系统的开发和人工系统的调控都有重要指导意义。

以往的许多研究都是从自然生态系统的角度来探讨自然资源的开发是有一定片面性的，而且运用自然生态主义的原理得出的许多有关资源开发的结论距现实相距甚远，难以操作。资源生态学的研究既要从自然科学的角度，也要从社会科学的角度来分析。总之，我们应当把握以下几点：

1）资源包括自然资源和社会资源，而且二者是相互依存、相互作用的统一体。

2）资源开发过程实质上是一个社会资源对自然资源作用的过程，是在人类作用下，自然资源在其形态、价值、能量等方面流动的一个过程。这一过程受自然规律和社会经济规律的共同支配。

3）资源开发过程是人类对自然界和人类对其本身的干预和改造的过程，因而必然要使原自然生态系统发生变化，进而产生相应的生态环境问题，人类可通过对社会资源的改善来改变这些生态环境问题的性质和程度。

4）自然资源结构及丰度决定某一区域的发展潜力和产业结构的功能和这种潜力的实现程度。相比较而言，社会资源的改变具有明显的阶段性，相应地自然资源的开发也

表现有阶段性，而且所产生的生态环境问题也同样具有阶段性。在一定阶段，生态环境问题的解决不能跨越其阶段性。

二、资源生态学的研究内容

1. 资源分布规律

从世界范围看，资源分布在不同国家和地区间差别甚大。这种差别一方面表现在整体资源丰度与组合上，另一方面表现在某一个体资源与其他资源的差别，同时也表现在人均资源水平的差别上。

自然资源是自然生态系统中的重要组成部分，它的空间分布受制于自然生态系统的变迁与演化。它的时间分布则与社会经济系统变化水平密切相关。因此，自然资源分布规律的研究应集中在以下几方面：

1) 单项资源分布规律。主要研究某一资源的分布与其他资源或环境因素的关系以及分布的数量和质量特征。

2) 整体资源分布规律。把自然资源分为若干亚系统，如农业自然资源、矿产资源系统等，研究这些亚系统的分布特征及其与产业发展的关系。此外，从生物圈或生态圈角度，研究自然资源空间分布的整体性以及局部自然资源的变化对整个区域自然资源系统的影响。

3) 自然资源分布与社会经济资源分布关系的研究。这一研究领域是目前资源研究及生态学研究中的薄弱环节。实际上，自然资源在数量与质量上的分布与社会经济资源的分布是有一定的内在规律的。比如，一致性规律、差异性规律等等。研究这些规律有助于我们从更宏观的层次上理解资源、生态与发展问题。

2. 资源生态系统

世界著名生态学家 Odum 认为：生态学是研究“自然界的结构和功能”的科学。人属于自然界的一种生命体，无疑包括在自然生态系统之内。另一位著名生态学家 Tansley 认为：有机体不能与其环境分开，而必须与其环境形成一个自然生态系统。在这个囊括大气圈、水圈、岩石圈和生物圈在内的自然生态系统中，生命体(有机体或生物体)与其他生命体以及无机环境之间由于负熵的存在而永恒地进行着物质、能量和信息的转化交换， 在生态平衡与非平衡的矛盾运动中不断地演替着、发展着。由于自然资源是以对人类是否有用而界定的，人与自然交往的过程其实就是人类开发利用自然资源的过程，因而这个自然生态系统不仅具有自然属性，而且还具有社会属性。自然属性的过程是纯粹的自然资源与自然资源之间构成的生态系统，而社会属性的过程是自然资源与社会资源之间构成的生态系统，这一生态系统也就是所谓的资源-生态-社会经济复合系统。上述两种生态系统都是资源生态学研究的范畴，但在资源问题不断涌现的情况下，人类侧重研究的更是后者。相比较而言，人类与自然资源的关系问题是目前资源生态学的主要研究内容，但并不否认纯粹的自然资源生态系统的内容不是资源生态学的研究内容(由于有关纯粹的自然资源生态系统的内容在本书的其他章节已有较多的阐述，本章主要探讨的则是后者)。资源-生态-社会经济复合系统是从社会、经济角度出发，充

分考虑资源的可塑性，把生态经济平衡的基本理论作为支点，开展社会需求下的多宜性功能评判和抉择，通过综合分析，最终对资源开发利用和治理保护方案做出优化决策。

资源系统本身像世界上任何事物一样处于运动和变化之中，并在长期的自然演化过程中，各子系统之间维持一种相对稳定的平衡。这种平衡状态对内部和外部的干扰有一负反馈作用与机制，使得扰动不致破坏系统的稳定。但是如果扰动的强度超过系统所能忍受的阈限时，系统的结构和功能就会受到影响和破坏，物质交换和能量循环受到阻碍，严重时甚至导致系统的崩溃。生物圈是由动物、植物、微生物等生物成分和光、热、水、土、气等非生物成分组成，每种成分都不是孤立地存在着，而是相互影响、相互制约地形成一个统一的不可分割的自然综合体——大系统。而每一个组成部分本身又可以是一个子系统。对某种资源尤其是自然资源开发利用深度和广度的加大，有可能就会对其他资源系统造成不利影响。

3. 资源开发利用与生态环境的关系

自然资源是人类赖以生存和发展的物质能量基础，也是人类物质财富甚至精神财富的最终源泉。人类文明史始终贯穿着资源开发的过程。人类通过利用资源，不仅使人类得以生存发展，而且也使自然生态环境不断地发生变化。也就是说，自然资源的开发常常输出两种结果：一方面带来经济的增长，另一方面将引起或潜伏一系列环境生态问题。经济增长促进资源开发，又为环境、生态问题的治理提供了能力保障。环境生态问题既制约资源的开发利用，遏制经济增长，又会对人类生存状况和持续发展产生进一步的影响。这种变化趋势的选择取决于人类活动是否符合生态规律。然而，在现实世界中，客观地准确地判断或评价生态环境，科学地认识并理解资源开发过程中所产生的生态环境问题，怎样有效解决全球或地区所面临的生态环境问题，都存在许多误区与困难。因此，深入研究资源开发过程中生态环境问题的产生、积累等客观规律，进而提出切实可行的生态策略，是资源生态学研究的又一主要课题。

概括地讲，资源开发的生态效应有以下几种。

扰动效应：某种资源在一定范围的开发对(原生)环境及其生态关系产生一定的扰动，但并未导致环境“破坏”及生态失调，经过短暂调整，生态系统重新达到动态平衡。比如，森林资源的适度开发，会导致原森林环境及森林生态系统中各种物种关系的变化，但最终达到新的平衡。

连锁效应：指一种(类)资源的开发会促进或抑制其他资源的开发，或者引起环境的一系列变化。比如，能源资源的开发会促进那些需要能源的资源开发。某一类社会经济资源的开发必然促进其他社会资源和自然资源的开发。煤炭资源的开发会产生一系列煤烟污染。因此，资源开发中一定要考虑某种资源开发后所产生的各种连锁效应，充分利用正连锁效应而抑制负连锁效应乃基本原则。

正、负效应：许多资源的开发往往对环境会产生正、负两方面的效应，而且在现实社会中，正、负效应总是有主有次，取舍的标准是经济发达程度和价值观念以及负效应的性质和大小。在资源开发中，我们要充分发挥资源的正效应而尽可能地减少负效应。

滞后效应：有些资源的开发所引起的环境变化并未在资源利用初期表现，而是在开发中后期才表现出来，如农药造成地下水污染，地下水资源开采造成地下水位下降或漏

斗出现等。

累加效应：许多资源开发造成环境的变化是渐进的，通过数量的不断累加而导致环境的质变。

资源的环境效应目前研究较少，尤其系统深入的研究尚不多见。无疑，这个问题是今后资源生态学研究的重要内容。

4. 自然资源开发与保护的生态学原理

一定强度或一定规模的自然资源开发利用必然会对自然生态系统产生影响，为使这种影响不造成超出某种界限的生态环境问题，即合理利用生物圈中的资源，必须重视生态原理的运用。

物质、能量、空间、时间及多样性是五个最基本的生态学变量，由此而产生诸如生态位、生产力、稳定性、结构与功能等主要生态系统概念。自然资源作为自然生态系统的主要组成部分，无疑与以上基本生态学变量和基本概念是一致的。因此，资源开发利用的生态学原理基本上是围绕基本变量及基本概念而展开的。而且，这些基本原理之间存在很强的依赖关系。

5. 资源与生态环境理论问题

世界对资源危机及生态环境恶化已达成共识，但就危机和恶化原因以及怎样共同对待愈发严峻的问题，认识不够，争论较大。而且，全球性的共识并未形成全球性的行动；英国和其他西方国家正在扼杀在巴西里约热内卢签署的生物多样性公约，这使得已达成的共识显得苍白无力。固然原因较多且复杂，但有一点很值得注意，那就是对资源与生态环境问题特殊性理论研究不够。

(1) 资源危机原因

从某种意义上讲，认识资源危机原因可能比认识资源危机本身更具有现实意义。一般学者常常把资源危机笼统地归结为人口爆炸使资源消耗剧增；经济发展太快使资源消耗呈高指数增长；资源开发不合理造成巨大浪费和环境恶化生态破坏使可用资源大为减少四大原因。但有研究指出：世界资源危机的主要原因不在于此，而是发达国家对资源的无休止的挥霍，而且这种无休止的挥霍是靠掠夺发展中国家的资源而实现的。比如，占世界人口不到 20%的富国消耗着 80%以上的世界资源，占全球人口只有4.7%的美国，却消耗世界资源总量的 30%；美国仅夏季三个月中空调用电量就超过中国全年的总发电量；一个美国人因消耗化石燃料每年向大气中排放的二氧化碳等温室气体就相当于 8150 个印度人一年的排放量等。

从资源利用的这种极型分布来研究生态环境问题的不均衡性，是资源生态学不可回避的重要领域。

(2) 生态环境的经济属性

生态环境问题的实质是经济问题。因为：生态环境问题产生于人类社会经济发展过程之中；处于不同经济水平的人们对生态环境问题的认识不同，敏感性不同，要求改善和治理的能力不同；生态环境问题的治理和改善最终依赖于经济发展。

(3) 生态环境问题具有阶段性

这种阶段性与资源开发和人类社会发展的阶段性相一致。很难想像在以生物能资源开发阶段会有化石能资源和核能资源开发所造成的生态环境问题。因此，考察生态环境问题必须要与资源开发和经济发展阶段性相联系。

(4) 生态环境问题的阶段性不可跨越

对于一个独立完整的生态经济系统而言，生态问题的解决不能跨越经济发展阶段。就是说某一社会经济发展阶段只能解决某一类相应的生态环境问题，企图迫使处于低级阶段的国家或地区去解决高阶段的生态环境问题是徒劳的，甚至是灾难性的。

(5) 生态环境问题是无限滋生的

只要有人类经济活动，就必然会产生相应的生态环境问题；一种(类)生态环境问题消除的同时可能会伴随另一种生态环境问题的生产；在某一阶段(时期)内不被作为生态环境问题的问题可能在下一阶段成为生态问题；即使某种按照生态原理设计的多级循环系统仍然会产生设计时未曾预料到的某种生态环境问题。

(6) 生态环境问题具有不同类型、不同性质等属性

实际上，资源开发和经济发展必然首先引起环境的某些变化，但并不一定引起生态失调。我们真正关心的并非是变化本身，而是这种变化的幅度是否超过某一阈限或是否造成生态关系失调。而且，资源种类多样，其开发造成的生态环境问题的类型、性质等并不一样，比如，可逆性与不可逆性、暂时性与长久性、可消除性与致死性、必然性与非必然性等等。正确的生态策略应该是通过选择资源开发的种类或资源产业的发展或者采用先进替代技术来杜绝那些不可逆的、长久的、致死的及非必然性的生态环境问题；并不是要根除一切生态环境问题，实际上，没有不造成任何生态环境问题的资源开发或经济发展。

三、资源生态学的学科性质

资源的内涵十分广泛。资源开发利用涉及众多的诸如经济、文化、生态、环境、政治、法律等领域，并且与人类价值观和技术水平息息相关。生态学是一门综合性很强的学科，而且它总是通过演绎渗透而达到其综合。生态学学科家族如同一座开着许多窗户的房子，从不同学科窗口，可以观察理解不同的生态异质现象。全球性问题的不断出现使生态学演绎出越来越多的子学科群。在资源问题的驱动下，资源生态学就是资源科学和生态学交叉而产生的一门边缘学科。

资源生态学的研究对象是资源生态系统。准确认识和把握该系统的结构和功能，对于解决资源问题，指导工农业生产具有重要的实践意义。人类要生存发展，就要利用资源，因而时时刻刻都处于一定的资源生态系统之中。只有掌握资源生态系统协调运转的实质所在，人类才能有的放矢。从这个角度看，资源生态学具有应用性的特点。

资源生态系统是一个整体。一个子系统的变化必然引起大系统的涨缩。并且，在时间变化上资源演变也是一个整体，过去影响现在，现在预示未来，无论是系统的时空演替，还是生态失衡带来的滞后效应，都说明了这一点。因此，资源生态系统的整体性决

定了其研究方法的综合性。另外，资源问题本身就涉及并包含着复杂的自然与社会因素，因而资源生态学的研究一定是横跨自然科学和社会科学的综合研究。Simmons 在其《自然资源生态学》(“*The Ecology of Natural Resources*”)著作中，非常强调人在自然资源生态系统中的作用。不仅如此，他更强调文化在调控、管理生态系统中的作用和意义，对生态与经济在资源开发中的相互作用给予充分的阐述。这些都说明资源生态学具有较强的综合性。

第五节 资源生态学的基本理论

一、资源过程理论

人类开发利用资源的真正目的，在于通过一系列功能过程把资源转化为能满足人类生产生活需要的各种产品。就是说，资源是不断地在系统过程中进行物质和能量的循环与转化的；与该过程相伴，其功能也在不断地改变。另一方面，在资源的转化过程中，人类建立了相应的产业部门；这些部门行业的发展又反过来促进资源的深度与广度的开发。资源过程论的第二个论点是资源的不断发展和替代。这里可能有两种情况，一是对可更新资源而言，由于本身可通过更新、循环及世代繁衍等得到永续利用。新旧更替、世代更替就是一个连续不断的过程。二是对非再生资源(相对于人类开发的速度而言)来说，比如能源，人类由于科技进步会发现替代能源。对二次性资源和社会资源，这种不断的更新替代过程更是显而易见的。资源过程论告诉我们，要注重资源在转化过程中的效率提高和新的替代资源的发现；同时也对解释资源领域许多争论不休的问题会有帮助。

二、资源的生态经济平衡理论

资源开发具有双重效应，资源开发推动经济增长是要付出环境生态代价的。理论上承认这种事实是明智的、科学的。问题是如何把这种代价缩小在最合理限度。从技术上看，这是可行的。当然，现实世界是无限复杂的，并存在着许许多多的差别，许多具有典型意义的、生态代价甚小的资源开发和经济发展模式往往在推广时就失去了原来的意义。这启示我们，在宏观发展战略的把握上，应该寻求资源开发过程中生态与经济的最佳平衡，以最小的投入获取最大的收入，并尽可能减少其生态环境负效应。值得强调的是，这里的生态并不仅仅指所造成的生态问题，而且更强调生态原理的应用、生态意识的强化，在提高生态效率的同时带来更大的经济效益。此外，这种平衡也包含区域、部门、时间上的平衡。即资源生态学的研究应当重视跨区域、跨部门、跨学科和跨时间的战略研究。

三、资源生态系统理论

在资源生态系统中，社会资源作用于自然资源，二者的物质与能量投入经过基本的

生态功能过程得以循环转化，最终以一定的产品满足特定的人类需求。按系统论基本原理，一方面资源系统自身的动态平衡是维持该系统可持续存在的基础。另一方面各资源系统之间彼此释放的功能要互相耦合，建立良性的互馈机制。在人与自然这个巨系统中，人类社会系统对资源环境系统所施加的影响要适应资源环境自然系统的功能释放、更新与调整的能力；资源环境系统提供给人类社会系统的功能要符合于人类社会维持生存发展的基本要求。这条系统间的功能耦合原理，便是人与自然关系的协调原则。系统间的功能耦合，系统内的动态平衡，是经济社会与资源环境协调发展最基本的原理。资源生态学的任务就是研究资源生态系统的功能过程及其机理，进而为最大限度地利用资源开发的正耦合效应的实践提供理论指导。

四、资源流动论

透过世界或国家经济发展的现象，看到的是一幅资源流动的图像。自然资源、人力资源、资本资源、技术资源等等，无论是国际之间或是地区之间都在愈益频繁地流动。 这种流动有公平流动和不公平流动之分。与资源流动有关，环境污染与生态问题也呈现出类似的趋势，比如“有毒垃圾”输出，环境污染与生态危机的转嫁等。然而，资源流动的趋势、后果、格局等有关问题，仍然未引起资源学者的高度重视。这为资源生态学的发展提供了广阔的研究领域和范畴。其实，深入研究这一问题，有助于我们正确分析区域的差异，进而为国家或地区的公平发展和持续发展提供许多具有重要意义的战略决策依据。

五、资源价值与产权理论

资源有价。这种价值一般指商品价值。但有些资源的价值往往表现在审美价值或精神文化价值上(旅游资源的旅游价值)。不论哪种价值，资源有价已为学术界与决策界所共识。因此，资源成为财富的象征，拥有资源则拥有财富，开发资源等于财富增值。分别来说，自然资源决定了经济增长的潜力和格局，即潜在财富；这种潜力和潜在财富的实现，则取决于社会资源是以何种方式和何种强度作用于自然资源的。这里隐含着资源价值核算问题和产权归属问题。就是说，资源价值核算和产权对资源开发和经济发展具有十分重要的作用，尤其对正处于体制转轨时期资源廉价、产权界定不清的中国，更具有现实的理论意义。

六、资源配制理论

自然资源是人类共同的财富，人类应该公平享受自然资源。自然资源分配的公平性包括代际公平和代内公平两个方面。自然资源分配的代际公平有三级内涵。第一级内涵是指规则公正，包括产权是否充分界定，产权的权利、义务关系是否清晰，社会的激励机制及约束机制是否健全等；第二级内涵是指自然资源在各代人之间的分配是否公正， 包括两方面的含义，一是现代人对自然资源的消费是否适度，即现代人的经济活动是否破坏了后代人的发展基础，二是现代人对自然资源的投资是否与他们所消耗的资

源量相匹配，对自然资源的投资包括修复、改善自然生态条件的投资，保护自然资源的投资，对科研部门的投资等；第三级内涵是指现代人对自然资源基础及后代人的补偿行为能否实现。自然资源分配的代内公平主要指自然资源在不同国家或地区之间分配的公平性和在同一国家或地区内部资源分配的公平性两方面内容。

第六节　资源、环境与经济作用的机制

一、资源、环境与经济相互作用过程

1. 资源、环境与经济是相互依赖的统一整体

中国大百科全书环境科学卷对资源、环境的定义为：自然环境是指客观存在的物质世界中同人类、人类社会发展相互影响的物质和能量的总和，主要是指大气、水、土壤、生物和阳光等。自然资源是自然环境中可以用于生活和生产的物质。资源是环境的组成因素，二者本身就处在紧密联系的资源环境系统之中。人类自身也是环境的产物，人类社会、经济活动对资源环境施加了广泛而深刻的影响，加速了资源、环境系统的演变，反过来，资源和环境又对社会、经济系统产生强烈的影响。

经济活动是人类开发利用自然资源以满足物质和文化需要的活动。它以自然环境为场所，以自然环境中的“有用”物质即自然资源为物质基础和劳动对象。在经济活动过程中，除生产人们需要的产品外，还产生“三废”物质，在一定程度上环境可以容纳和净化废弃物，但超过了一定的限度，就会导致资源破坏、环境污染，乃至生态系统的恶性循环，反过来又阻碍社会经济的健康发展；同时，经济的发展又是资源与环境保护和生态良性循环的保证。因此，资源、环境与经济三者处于相互依赖相互影响的统一整体之中。

2. 经济与资源、环境的正向过程——协同、进化的良性循环

经济是以人为主体来运行的，资源是对人有用的环境要素，环境则是人类生活的空间和条件。经济系统对资源环境具有积极、能动的作用，资源环境对经济具有最基本和后发影响，有时甚至是决定性的作用。人类不断增长的各种需求使经济、资源与环境三者紧密地联系了起来，使自然资源和自然环境深深地打上了人类经济和社会活动的“烙印”，它们不仅遵循自然规律进行着自然演变和自然再生产，而且在社会经济规律作用下进行着社会再生产和社会历史性的演变。因此，今天的资源与环境并非纯自然的，而是自然历史的复合体。

经济的一个重要特点就是它的协调和组织功能，不仅协调生产过程，而且协调消费过程。即通过消费获得满足的过程必须与生产过程协调一致，生产部门必须生产适销产品和提供对路的服务，避免产生那些不但不能满足人类的需要，反而污染环境，损害人类利益的有害物质和能量。一个协调运转的经济系统才可能实现对资源的最优配置和高效利用，以及对环境的持续利用。

根据生态学原理，协同是生物与环境间互利的活动，进化则是生物与环境经过相互

选择适应过程而实现的共同发展。一个开放的经济系统经过人为的内部协调与外部环境进行适度的物质、能量和信息交换，也可趋于动态同一的阶段性稳定状态，即最适整体效益阶段，从而实现经济系统与资源、环境相互协调、彼此促进、良性循环。

具体而言，人们遵循自然规律与经济规律科学地组织经济活动，根据资源承载力和环境容量进行适度的经济活动，实现对自然资源合理的开发利用，获得较高的经济效益，同时对资源再生和环境保护投入日益增多的资金，使资源不断更新以满足经济发展对资源日益增长的需求，使污染物的治理量不断增大，污染物的积累量小于环境容量，又获得较好的资源效益和环境效益。资源、环境状况的改善又促进社会经济发展，进而获得良好的社会效益。最终实现经济效益、社会效益与资源效益、环境效益的统一，使社会经济系统与资源环境系统协同进化，良性循环达到可持续发展的目的。

3. 经济与资源、环境的逆向作用过程——矛盾、制约的恶性循环

资源、环境与经济也有各自运行规律，违背这些规律，将导致相互间的矛盾和制约， 以至恶性循环，形成三者的逆向关系。恩格斯早在三百年前就告诫我们，不要过分陶醉于我们对自然界的胜利，要时刻警惕自然界对我们的“报复”。但是，在过去的发展历史中，人们只顾发展经济，不顾资源与环境的保护，无度地向自然界索取，只考虑当时的、短期的经济效益，不管长远的社会效益和环境效益。结果经济虽然获得了成倍增长，但却造成了资源与环境的严重破坏，人们因此付出了与日俱增的沉重代价。据统计，第二次世界大战以来，美国国民经济总产值增长了 100%，污染却增加了 20 倍，1970~1975 年的 6 年之内，美国每年污染损失平均达 500×10^8 美元，日本 1970 年环境污染造成的经济损失达 220×10^8 美元。据世界银行推算，我国目前每年因大气和水污染、尤其是细微大气颗粒物对人体健康的危害造成的经济损失竟达到 540×10^8 美元，几乎是我国国内总产值的 8%。并且，在经济增长中，若不采取全面措施治理污染、保护资源，则环境污染和资源耗竭的速度大大超过经济发展的速度。

生态破坏、环境污染一方面造成直接经济损失；另一方面使人类生存与发展的条件与空间潜伏着巨大危机，影响未来的持续发展，生态破坏导致环境自净能力的削弱，使环境容量降低，制约经济增长的速度和规模；而且阻碍可再生资源的再生产过程，造成不可再生资源的极大浪费，进而因资源短缺大大限制经济的发展；经济落后无力投资治理污染、保护资源，使环境污染与资源危机进一步加剧。长此以往，人类社会将丧失可持续发展能力。

4. 资源、环境与经济相互协调的基本准则——可持续发展

把资源、环境与经济发展结合起来，走可持续发展的道路应该是当今社会经济发展的最佳模式。可持续发展不仅仅是一种发展模式，而且是人类新的行为规范和准则，也是人类的一种新的价值观念。它强调人类追求健康而富有生产成果的生活权，并且倡导人类与自然的和谐与统一；反对人类凭借着技术和资金投入，以无度浪费资源、破坏生态系统和污染环境的生产方式来实现人们所崇尚的发展权。与传统的经济增长模式不同，可持续发展重视自然环境、人工环境和文化环境的价值，同时为了实现代际间的公平性，强调合理开发和利用资源和保护环境。

协调资源、环境与经济发展间的关系必须改变传统思维观念，建立新的发展观。首先，必须要改变传统的经济统计方法，使统计结果不仅反映出实物的变化，也应该体现出国民生活质量、社会福利和生活环境等指标的变化。其次，要树立经济与资源、环境是相互依存和相互作用的观念，经济运营的方式影响着资源和环境的变化，资源状况和环境的质量也影响经济发展。经济运营方式，不仅仅是一个企业和个人行为，同时也是一个政府行为。可持续发展的思维和合理的经济运营方式，对合理利用资源和保护环境，提高国民的生活质量无疑会起到巨大的作用。

对于资源与环境开发和利用从持续发展的观点出发，应立足于以下 3 个基准：一是可再生资源的利用速度(如土壤、水、森林、鱼类等)不能超过其再生速度；二是不可再生资源的利用速度(如化石燃料、优质矿石等资源)不能超过以可持续的方式利用不可再生资源的替代速度；三是污染物的排放速度不能超过环境对这些物质的循环、吸收和无害化处理速度。

对于可再生资源的开发和利用应保持在可持续的最大收获量之内，向自然环境投放或排放的各种废弃物要低于自然环境自身的吸收和净化能力，这才是最佳的经济开发模式。在传统经济学中，假定经济活动的主体是“经济人”，追求最大利益是经济行为的目的，在这种利益动机驱使下，事实上很难实现资源的可持续利用和环境的自我良性循环。要想协调资源、环境与经济发展间的关系，必须对资源和环境这一供给给予适当的价格，即资源和环境与其他的商品或服务相同，具有其自身的价值。把资源和环境的价值通过市场完全体现出来，由市场机制来调节在经济活动过程中反映出的资源和环境问题。如通过市场调整资源合理流动和利用方式，由税收等经济杠杆，解决经济和社会活动过程中产生的环境问题。

二、资源、环境与经济发展相互作用机制

资源和环境问题除其自身原因外，主要是经济过程中的“副产品”，是一个经济问题。因而也就有着深刻的经济学内涵和原因。

(一) 资源与环境问题的实质是外部不经济性

1. 经济活动过程中的“正品”与“负品”

经济是受人类需求驱使的复杂组织系统。它包括生产、流通、分配和消费。生产过程是利用知识和技术通过劳动开采和加工自然资源，为人们生产商品和提供服务的过程。它受那些不以人的意志为转移的物理规律的约束，如物质不灭和能量守恒定律。任何生产过程都存在两种产品，一是对人类有用的商品和服务，可称为“正品”，一种是对人类没有价值或有负价值(有害)的物质和能量——废物，即“负品”。高效合理的生产能把物质和能量转化为对人类更有价值的东西，同时产生较少的废物。相反，低效不合理的生产则会产生大量有害废物，造成对资源的破坏和浪费，也污染了环境。

消费是人们把生产的产品(或自然资源)通过消费过程和技能来维持生命并获得满

足。消费也要受物理规律的约束。消费了的商品并不消失，而只是转化成了其他形式的物质和能量，其中除满足人类需要的外，还有对人类没有价值的废物。因此，生产和消费只是转化过程，而非物质的创造和消灭过程。由于物质不灭和能量守恒定律的作用，任何生产和消费都是有限度的，任何经济活动也都必然要产生废物，只是程度不同而已。

2. 经济活动的外部不经济性

经济活动的效果具有二重性，一方面它以商品和服务满足人类的需求利于人类的生存与发展，称为“外部经济性”；另一方面它又产生废物造成不良环境污染，损害人类的利益。就经济过程来说，对资源的破坏、浪费和对环境的污染是经济过程产生的“外部不良效果”，也称外部不经济性。众所周知，任何经济活动都企图追求效益最大而成本最小。从理论上来看，当某一经济活动的全部效益大于该活动所承担的成本时，这种活动就会发生。不合理经济活动中对资源的破坏和环境污染的发生就是因为把这种外部不经济性(属于经济过程的成本或代价)转嫁给了社会大众，从而使该经济活动的总效益大于总成本。这样做的后果一方面使经济活动的支配者得到超额收益，另一方面却减少了大众福利，降低了生活质量，还影响整个生态系统的持续发展。今天，在全球资源环境遭受长期破坏和污染的情况下，经济发展不足、贫穷落后的发展中国家，也难以防治和抵御自身发展中出现的和发达国家转嫁的双重资源与环境问题，从而导致经济发展中大量的“外部不经济”现象。这是当今环境问题的主要表现之一。

3. 传统发展模式的弊端

在传统的经济发展模式下，人们以追求经济效益最大化为核心，忽视环境效益，往往只重视对自然资源掠夺式的开发，不重视对废物处理和资源合理利用的投人。在时间上，经济利益可直接反映出来，而环境效益在客观上需要一定时间才能体现出来，具有滞后性，这种差别又促进了只顾眼前利益，不顾长远利益的做法，使许多个别工厂追求利益最大化的同时，造成了环境污染的普遍性和社会化；环境污染造成了生产的“外部不经济性”，是与经济系统的基本原则相悖的，而传统的发展模式在生产成本中，只考虑资源开发利用的投人费用，不考虑废物处理和资源更新的费用，将这部分隐蔽的巨大费用转嫁给社会，危害了社会环境，增加了公共开支，是以牺牲资源与环境效益为代价换取经济利益。因此，从长远看，这种开发模式将使社会经济丧失持续发展的能力。

(二) 资源、环境与经济发展的矛盾

1. 资源、环境稀缺性与人类需求无限性之间的矛盾

根据物质不灭和能量守恒定律，自然资源和环境要素并非取之不竭、用之不尽的， 而是有限的，同时资源分布的空间差异性和部分资源地理位置的固定性，使自然资源和环境具有稀缺性特点，进而影响到经济活动的有限性。相反，由于人的欲望的无限性，人类对物质和精神的追求是无止境的。这种矛盾结果促使人类在有限的资源和环

境基础上最大限度地开发资源，生产最多的产品，以满足不断增长的人类需求。这是人类追求生产最大化而导致资源与环境问题的基本动因。

2. 经济活动的“个体性”与资源、环境“公共性”的矛盾

经济活动归属不同的经济主体，因而具有个别性和局部性，而资源、环境属于公共财产，代表大众利益。经济活动中的外部不经济效应必然造成公共资源的破坏和大众环境的污染，在大家很难实施监督管理的情况下，这种低效率的结果就更为严重。

3. 资源、环境与经济相互之间的矛盾

资源、环境与经济分属不同范畴，各自遵循不同规律，三者既相互联系，又彼此矛盾。资源和环境基本上受制于自然规律的作用，同时也受人类社会规律的影响；经济活动属于社会范围，它主要受社会经济规律的作用，同时也受自然规律的影响。经济活动若违反了自然规律，就必然造成对自然资源和环境的破坏，从而受到自然界的无情惩罚。

（三）市场失灵导致环境退化

在健全的产权体系中，市场就像一只“看不见的手”，对资源配置发挥着巨大的作用。市场体系中的价格具有刺激生产和在消费者之间分配商品和服务的作用。价格的变动反映着资源稀缺性和需求变动符号，从而刺激生产者和消费者做出符合市场行情的最佳选择。对那些十分有限的可耗尽资源，价格机制也能纠正短缺问题，抑制消费，鼓励发现新的资源并保护资源、高效利用资源和开发代用品。但是，现实生活中大量的事实却证明了市场有时并不能按照理想的方式有效运用。因此这些市场决策的价格不能真实反映资源利用的社会成本和效益，扭曲价格传递了错误的资源稀缺信息，对资源保护、管理、有效利用难以产生足够刺激，从而导致对自然资源的过度开发或开发不足，造成环境退化。

产权关系模糊和缺乏产权是市场失灵的根本原因，在产权不具有排他性的情况下，对资源与环境开发、利用、治理和保护的责、权、利关系就无法确定。这就意味着所有与生产或消费某种商品相关的成本和效益并非都加给了生产者或消费者，而是转嫁到第三者身上，从而产生外部性问题。有外部性的市场不能有效配置资源，因为价格已不能完全反映生产或消费的社会成本，生产者和消费者将生产过量的废物污染环境。因为其生产或消费决策仅与私人或个体的边际成本和效益结合，而不考虑完全的社会边际成本。如果企业或个人的生产和消费行为给第三者造成了损失而没有补偿的话，就产生了负的外部性问题，即外部不经济性。

另一方面，作为公共资产的自然资源和环境有时很难定价或对其收费，任何人均具有对公共物品的使用权，因而其产权没有排他性。因此，个人或团体进行公共资产的保护将无利可图，因为不可能从使用者(公众)那里收回成本；同时也不会对消费者控制消费产生促进作用，因为大家都在消费。对于不可更新资源来说，一人的使用都是以他人

的不使用为代价的。开放型资源更易遭受过度利用。因为没有刺激机制使使用者和所有者节约资源，资源价值的耗竭将影响所有的人而不是个人损失。

自然资源和环境是与人造资本根本不同的自然资本。从此意义来看，破坏了资源或污染了环境就等于减少了资本，也就减少了人类赖以生存和发展的物质基础的可持续性。

三、经济发展与资源、环境相互作用的规律

1. 资源与环境演变的“U”型规律

在人类发展的初期，资源、环境与经济处在相对协调状态，生态系统按自身规律良性循环，资源、环境有序进化，环境质量因受自然生态的主导作用而处在较高水平；随着社会生产力发展，人口增长对经济的需求增大，加大了资源开发的速度和广度，经济过程排放的污染物不断增多，环境质量下降，资源遭受破坏，这种状况持续到工业化起飞阶段，此时巨大的经济增长动量需要开发更多的自然资源并向环境排放更多的废弃物，环境状况恶化，资源、环境与经济发展相互对立；随着工业化过程的结束，人类进入到高度现代化的社会，人们追求资源效益、环境效益、经济效益和社会效益的统一，对资源保护和环境治理的加强促进了生态系统的良性循环，生态质量与环境质量提高，人类迈向持续发展。但这只是一个基本过程，新兴工业化国家和地区利用后发优势可以减缓这和睦趋势。

2. 污染物传递的“倒金字塔”规律

排放于江河湖海和土壤中的工业有害元素会在生态系统中沿“食物链”逐渐由低级生物向高级生物传递、聚集，使受污染的高级生物体中的有害元素含量比低级生物体中的含量高数倍、数十倍、甚至数百倍，对人体健康和生物再生产造成严重危害。掌握这一规律，有利于我们在环境治理中及时阻断有害元素的传递与扩散途径，预防和避免环境事故。

3. 资源、环境效应的“后发优势”规律

人类社会活动对资源、环境的影响(包括正负两方面的效应)多数不会马上表现出来，而是随时间的推移不断积累、加剧，到一定程度以极大的变化出现，有的甚至是质的变化，如水体污染导致生物死亡、植被破坏导致水土流失和气候干旱以及人们恢复重建生态系统等。这种滞后的资源、环境变化一旦出现将以巨大的效应对社会经济、资源、环境产生深刻的影响。

4. 资源利用和替代的不确定性

科学技术是不断进步的，但是其未来发展以及对资源的影响是不确定的。技术的不确定性就是对新技术的有害影响缺乏了解(这可能会鼓励过早地应用这些技术)和没有能力预见未来可能发展的新技术。对新技术过分乐观将使不可更新资源的开发率过高而过早地耗尽这种资源贻害子孙后代，对未来技术的过分悲观将导致对可耗尽资源开发的不

足；另一方面技术发展将为目前不是资源的东西发现新的用途，使目前价值较低的资源找到更高价值的用途。

就长远的未来考虑，后代人口的数量、兴趣和偏好以及各种需求与当代人可能有很大不同。因此未来对资源需求也存在着不确定性。未来需求模式的变化将使资源的稀缺格局产生不确定性，进而影响未来社会资源的供求态势。技术的不确定性正是从供给和需求两方面来影响资源不确定性的。

由于资源的不确定性，就给人们选择资源的用途加大了风险。对一种资源用途的选择就意味着对另一种资源使用机会的丧失，这里的选择不仅要承担机会成本，而且要承担因选择特定资源用途而可能产生的所有风险。如对物种资源开发利用不当可导致物种的永久消失。

5. 资源与环境问题的不可逆转规律

热力学第二定律指出，可逆与不可逆之间是一个真正的连续体，而且这个连续体的端点是无法观察到的。这里的可逆与不可逆是相对的。在一定的财力和时间内，某个初始状态不能得到恢复，我们就称之为不可逆转的变化。

现实生活中许多对自然资源的破坏和对环境污染的严重后果需要经过长时间，并要付出巨大代价才可能恢复的，有些结果即使付出巨大代价也是不可逆转的。如生物物种的灭绝就是不可逆转的。为此，在进行诸如资源开发和利用方案的选择时，必须计算安全边际和生态阈值，确定最低安全标准，避免不可逆转后果的出现。

第七节　资源生态问题的解决途径：资源生态学的综合研究

综合研究是当今科学研究的一个重要发展趋势，也是认识和解决复杂问题的根本途径。资源是一个庞大的系统，它的开发利用过程又是一个复杂的自然过程、经济过程和社会过程。加强对资源的综合研究，是社会发展对资源科学研究提出的重大课题。人口和经济增长的强大社会需求，无疑对资源提出了严峻的挑战。在全球经济一体化，资源环境、生态全球化趋势下，资源、人口、经济、环境、生态、社会等越来越明显地交织在一起。在我国，资源领域存在的条块分割、利益冲突、管理混乱、利用低效、资源破坏等严重问题，正在遏制着我国可持续发展战略的有效实施。因此，加强资源的跨学科、跨区域、跨部门、跨时期的资源综合研究，刻不容缓。

一、资源综合研究的现实紧迫性

资源是一类客观存在的综合物质系统。对特定区域而言，客观存在着各种各样的资源(土地、森林、水、矿产、能源、人力、资本、技术等)，且相互作用，不断变化，组成有机整体。社会经济的发展过程实际上是人类掌握的社会经济资源作用于自然资源的过程。一般说来，在特定历史条件下，这一过程输出两种结果：经济增长和环境问题。因此，可持续发展战略总体目标要求在充分考虑国际资源背景下，区域之间、区域内部、部门之间和产业之间，要合理配置资源，高效利用资源，有效保护资源，实现资

源与人口、环境与发展之间的协调一致。显然，这是一个涉及区域、部门及国家整体利益、关系长远与当前的极其综合性的跨学科、跨区域、跨部门、跨时期的战略性问题。

我国长期以来未注重从生态系统角度对资源进行深入研究，实践上对某一资源或某区域资源的开发对其他资源或其他区域带来的不利影响重视不够，长期以来，由于计划经济体制等原因，对资源经济特别是资源产权、资源核算的研究不够，形成千百万资源无价、原料低价、加工品高价的不合理资源利益分配格局；未能重视超越部门、区域和时间的资源综合研究，造成资源重复计算、"诸侯割据"、"竭泽而渔"或"杀鸡取卵"、重复建设等严重问题；缺乏或忽视资源的法制管理，导致资源开发"占山为王"，低价圈占，暴价出售，资源闲置，资源利用低效。这一切是由于缺乏对资源的综合研究。

我国现阶段到 21 世纪中叶，资源与人口、环境和经济的发展矛盾将愈来愈突出和尖锐。资源是问题的核心。只有对资源系统本身进行综合研究，提出适合我国国情的资源战略和资源高效利用的技术与管理体系，才能满足 16×10^8 人口和经济增长对资源的需求，才能有效地根治和解决愈加严重的环境生态问题。为此，必须对资源及其与相关领域之关系进行跨学科、跨区域、跨部门、跨时期的综合研究。单一资源或单一部门资源研究固然重要，但不能解决"四跨"性的综合问题。我国主要资源(如土地、水、森林、能源、矿产资源等)管理权基本上归属于各产业部门，而且都配备有雄厚的科研力量。这种从产业和行政管理角度对各种单一资源进行深入研究和管理是非常重要的，但由于客观存在的部门利益和研究任务的需要以及专业的局限性，这种单一资源或单个部门的资源研究往往很难从国家整体上进行超越部门利益的资源综合研究，所引起的后果是严重的。这种实例在现实中普遍存在，比如，研究工作中常常发现某地区单项土地资源数量之和大于其国土资源总量；某一单项资源的开发会对其他资源带来不利影响；全国地下水资源数量各有关部委或相关研究单位各有各的说法。显然，不同答案将产生完全不同的决策，带来不同的后果，从国家整体可持续发展目标看，超越单一资源和部门局限的资源综合研究，事关中华民族 21 世纪的生存与发展，不可不给予高度的重视与强化。实际上，对特定区域发展来说，即使单项资源也存在着综合研究的必要。比如，土地资源可垦为耕地，也可种草植树，也可发展房地产；耕地资源可种大田作物，也可种植果树、蔬菜等；对水资源而言存在着城市用水和农业用水的矛盾，存在着水资源开发和相应环境问题。因此，要根据某种资源的自然规律，确定其生态适宜性；同时根据经济规律，确定其开发利用的最适规模及开发类型。

二、资源综合研究的科学内涵

如果把自然资源和社会经济资源作为一个完整的资源系统来看，可简单划分为初始资源、中间资源、产品资源和废弃资源 4 种过程类型；如果把资源开发、资源利用、相关环境生态问题、资源管理等作为相对完整的资源动态过程来看，那么，社会经济发展过程都可理解为以资源为核心的资源开发、利用、配置、管理等复杂的自然与社会经济过程。这是一个由多种资源参与、多种资源过程交错、多部门利益驱动的资源综合作用过程。所谓资源综合研究就是根据特定的区域发展目标和资源基础，在各类资源的自然

规律和社会经济规律的研究基础上，综合分析各类资源的数量、质量、特征、开发布局、开发利用可能产生的环境生态问题，深入研究资源与人口、环境、经济之间的相互关系，系统分析区域与部门之间资源的整体态势，探讨自然资源本身的规律，社会经济资源布局与配置的优化方式，提出跨区域、跨学科、跨部门和跨时期的资源总体战略、优化配置、高效合理利用、循环再生、有效管理等可实施的总体方案。

资源综合研究的重点在于从系统的角度和动态的思想方法入手，深入研究其功能过程中的各种复杂“关系”(图 10-1)。从目前看，资源综合研究包括 6 个层次的科学内容：① 中国与全球之间的资源互补、资源市场、资源贸易与资源竞争等。通过综合分析研究，确立我国中长期资源战略。② 我国区域(包括流域)之间的资源优势互补、合理配置、相互影响等，以确立我国主要区域的资源战略，确立社会总需求与社会总供给相互平衡的资源体系，为国家和区域可持续发展决策服务。③ 部门之间的资源权属、利益分配、协调合作等。通过综合分析，研究打破部门资源封锁、利益争夺等的对策，确立有效的资源管理体制。④ 产业之间资源合理配置、高效利用及有效管理等。⑤ 资源之间的有效配置。对特定区域特定部门而言，其内部各种资源之间存在着有效配置的问题。这种资源综合研究主要是通过区域发展战略和区域综合规划来进行的。⑥ 同一资源的综合利用和深度利用问题。如上所述，任何一种资源都存在各种不同的用途、不同利用途径、不同利用方式、不同深度或层次的利用都必然产生不同的结果，相应地带来不同的问题。

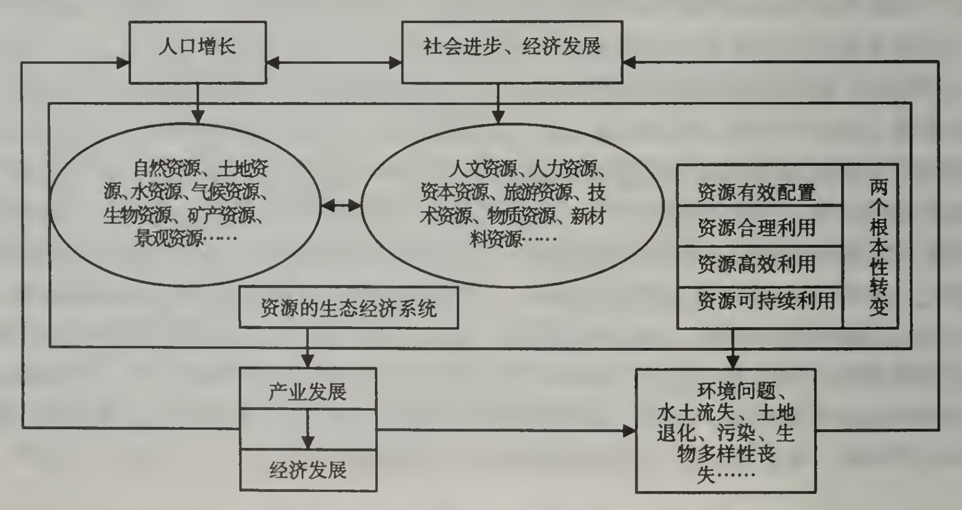


图 10-1　资源系统过程与环境、社会经济相互关系(成升魁　2000)

从全球特别是我国情况看，资源综合研究的重大领域主要有：① 资源、人口、环境、发展之间相互关系的研究。在发展是目标、人口是前提、环境是基础或条件、资源是核心这一总体原则基础上，研究其相互作用规律，并提出重大资源战略对策。应该看到，由于当前人类进入信息时代和知识经济时代，世界各国之间、各区域之间的联系愈来愈明显，作为这一矛盾统一体中最关键的因素，资源与发展之间、资源与环境之

间、资源与人口之间的矛盾也从未像今天这样达到近乎全球一致的程度。可持续发展可以看成是人类对这种复杂系统认识的最高思维成果。但这里需要强调，可持续发展只能作为指导人类处理资源、人口、环境与发展矛盾关系的总体原则，而不能代替其中的过程与机制的科学研究。② 各类资源之间的相互关系。对特定地区发展而言，任何一种资源的开发利用都会对其他资源产生各种影响，其中有正效应，也有负效应。比如，湿地资源的开发会对其中的生物资源的开发带来不利影响；大型资源工程(如大柳树湾水利工程)必然要对周围乃至流域的资源及环境产生一系列影响。③ 各类资源开发利用的过程(资源树)及其与产业化的关系(图 10-2)。通过开发资源形成产业，既是生态过程，也是经济过程，又是社会过程。因此，资源综合研究必须同时注重生态规律、经济规律及社会发展规律的交互作用。④ 资源开发利用工程的综合研究(如三峡工程，小浪底工程)。应该说，任何大型资源开发工程都会对周边地区的其他资源、环境、经济产生深刻影响，尤其对自然生态的影响是短时期内很难预测的。因此，特别需要进行综合的、系统的、长期的研究。在大型资源开发工程的论证上，应该是科学说了算，而不是政治说了算。⑤ 资源生态、资源经济和资源管理的综合性研究，包括资源形成、演化、质量数量特征、分布规律、生态系统过程以及资源产权界定、价值核算、优化配置、高效利用技术、管理对策等。⑥ 中、长期资源的国家开发战略研究，如粮食发展的资源长期战略，资源保护远期目标，“两种资源”与“两个市场”战略，长远人口战略等。

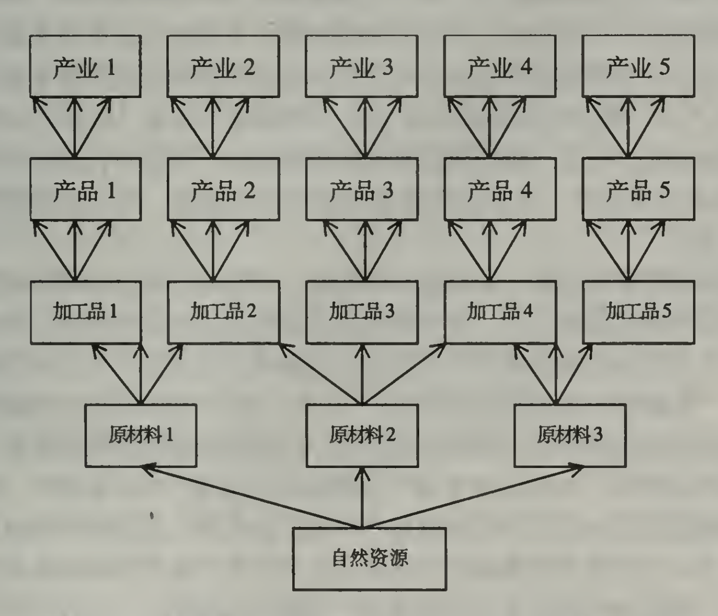


图 10-2　自然资源开发利用与产业发展之关系(成升魁　2000)

三、如何加强资源综合研究

首先，各级决策部门特别是国家高层决策部门，要对我国在市场经济下加强资源综合研究的重要性、必要性和紧迫性给予清醒的认识和高度的重视。其次，资源综合研究必须跨区域、跨部门、跨学科、跨时期。否则，局限于单一部门、单一资源、单一区

域、单一学科的只重眼前利益的决策，都将带来严重后果。第三，特别需要加强具有“四跨”特色的资源综合研究单位。只有这样，重大资源战略决策才有可能不造成偏颇或失误。第四，人口、资源、环境与发展是当今世界大热点领域，我国政府应像重视人口与环境那样，成立国家级的资源管理机构，比如国家资源委员会，进行统一部署和统筹规划。这样，才能从根本上超越部门、区域利益局限，使资源这一千秋万代的事业兴旺发达。

学术界和决策界需要重新认识资源综合研究。目前，在资源综合研究问题上或资源科学发展问题上，在决策界和学术界，有不同认识误区。第一，认为单项资源研究可以代替资源综合研究，单项资源研究部门或单项资源管理部门可以代替资源综合研究或管理部门。第二，认为单项资源学科比如土地资源学、水资源学等可以代替或等同于资源科学。第三，认为几乎所有地学及生物学研究单位都是研究资源的，例如，植物所研究植物资源，水生所研究水生资源，动物所研究动物资源，水科院研究水资源，林科院研究森林资源，农科院研究农业资源等等，没有必要存在综合研究单位。这些片面认识阻碍了资源科学在我国的发展，对我国可持续发展战略的实施极为不利。

从科学研究的角度看，资源综合研究的重点在于明确正确的思想方法和研究方法。由于资源本身是一个历史范畴的概念，因此，其综合研究跨越自然科学与社会科学。纯粹用自然科学的思维对这样一个复杂系统进行研究，而忽视社会经济环境的研究，容易陷入自然生态主义的泥潭。除了获取重要的自然规律或知识，对千差万别的复杂实践活动指指点点外，很难提出有效的管理对策。资源综合研究要求研究者必须用系统论的思想方法，对资源系统内各种资源之间、自然资源和社会经济资源之间、资源与环境、资源与人口、资源与经济的各种关系，从区域、流域、国家乃至国际的不同层次上，进行综合的定量分析，提出供需平衡的资源战略、资源可持续利用的技术与管理对策，预测资源发展趋势，为国家宏观决策提供科学依据，为全社会提供新的资源科学知识和新观念。

资源综合研究需要新思维、新思想、新视角。资源综合研究要被决策界和学术界广泛接受，必须对传统的思维方式，流行的观点与说法进行科学的反思，并提出新的研究观点。比如，人均资源量概念摈弃了长期以来占据统治地位的“中国地大物博，资源丰富”的观点；“资源节约型国民经济体系”为 21 世纪中国可持续发展框定了基本内涵。但目前仍有似是而非的许多观点阻碍着人们对资源综合研究的理解。如遇到资源破坏、环境退化问题时，往往习惯于说“资源利用不合理”。结合现实，资源利用的合理与否，不考虑或忽视当地社会经济发展水平和社会需求，是很难行的通的。因此，如何协调资源开发利用过程中环境生态与经济利益的矛盾，是资源科学研究的重要问题。另外，资源利用的合理与否，应该明确谁是“资源合理利用”的目标主体。小系统(如家庭、村镇、地区)的所谓资源合理利用对大系统(如国家、世界)不一定是合理的；同理，上一层次目标主体的“合理”不一定对下一层次的目标主体是合理的。诸如此类，资源综合研究必须在不同层次上对资源过程进行分析，科学地阐释复杂问题，为决策者提供可行的解决问题的方案。为此，需要从哲学上深刻地、辩证地对资源动态系统的生态、经济、社会过程进行多角度的透视，运用科学进行新的思维，推出新的思想，这种科学研究上的创新，需要多学科思维。例如，正在研究中的“资源场”“资源势”“资

源流”“资源能值”“资源树”等新概念，在一定程度上有助于阐明区域资源运动的内在联系和区域差距形成的重要原因。

最后需要强调，资源综合研究，尤其在我国，必须为经济发展服务，为缩小区域差异，城乡关系，增强国家整体经济实力提供有效的、可行的重大决策、建议或方案。

第八节　资源生态系统的宏观调控

一、实施可持续发展战略

可持续发展不仅仅是一种发展模式，而且是人类新的行为规范和准则，也是人类的一种新的价值观念。它强调人类追求健康而富有生产成果的生活权，并且倡导人类与自然的和谐与统一；反对人类凭借着技术和资金投人，以无度浪费资源、破坏生态系统和污染环境的生产方式来实现人们所崇尚的发展权。与传统的经济增长模式不同，可持续发展重视自然环境、人工环境和文化环境的价值，同时为了实现代际间的公平性，强调合理开发和利用资源和保护环境。显然，实施可持续发展战略，协调人口、经济、社会、环境和资源之间的矛盾，是人类未来发展的自身需要和必然选择。

从宏观上讲，可持续发展是一个全球性的问题，而从具体实施来看，又必须落实在国家上。不同的国家情况各异，经济发展水平千差万别，但无论是发达国家还是发展中国家都应以可持续发展作为自身的发展战略或发展目标，并制定具体的实施措施：①制定和实施符合本国国情的国家 21 世纪议程；② 要严格控制人口增长，提高人口素质，通过各种形式提高人类可持续发展意识；③ 建立、健全环境保护的法律和法规，为公众的环保行为提供制度保障；④ 建立资源节约型的国民经济体系；⑤ 倡导合理且适度节约的消费模式。

实施可持续发展战略，是一项综合性的系统工程，涉及国家观念、经济发展程度、人口素质、消费方式等方方面面。世界各国在这个过程中所面临的障碍和矛盾是不一样的。发达国家在经过一二百年的长足发展之后，开始大规模地治理环境污染，而广大发展中国家由于经济发展水平低，在生存与发展的两难问题上，首先关注的还是生存问题。可以想象，一个人均 GDP 几百美元的国家怎能和一个人均 GDP 上万美元的国家一样，进行大量的环境投资。甚至在一些极贫穷国家，资源和环境的重大改善还只是可望而不可即的、超过“基本生活需要”的发展要求。然而，严峻的现实和发达国家的实践告诉人们，发展中国家不能再走“先污染后治理”的老路，如果完全为眼前紧迫的生存问题所束缚，屈从生存的现实压力，一味地单纯追求经济增长，而不顾及资源的有限性和环境的承受能力，急功近利，则不仅损害未来发展的基础，而且也不能彻底摆脱贫困。因此，各国都应从全球角度、全人类立场看待可持续发展，都应努力为可持续发展创造一个适宜的和平环境，这是可持续发展实施最基本的条件之一。

发达国家和发展中国家在实现全球、全人类可持续发展方面应共同承担责任，这已是基本共识。但是，发达国家应有更大的责任，因为发达国家对现在的环境状况要承担主要责任，尤其是在全球温室气体的排放方面。因此，发达国家要率先削减排放，减轻对环境的影响；在限制总量排放的同时，还应考虑人均排放指标；应为发展中国家转让

公平、优惠的环保技术，提供一定的无偿资金支持和无息或低息贷款，还应帮助发展中国家消除贫困。发展中国家应该处理好生存与发展的关系，在努力加快经济发展、消除贫困的同时，增强环境生态意识，合理开发保护资源，大力推行清洁生产。

令人可喜的是，1992 年联合国环境与发展大会后，全球已有 2000 个地方针对当地情况，制定 21 世纪议程，有 100 多个国家成立了国家可持续发展理事会或类似机构。许多国家的可持续发展机构受到国家元首关注或由国家议会授权成立，并且充分发动非政府组织、社会团体、工商等社会各界的参与，对国家的可持续发展活动统一协调和监测。尤其是巴西、菲律宾等发展中国家在可持续发展方面的许多成功经验值得其他发展中国家学习和借鉴。如巴西在制定国家 21 世纪议程的过程中，除政府牵头外，强调社会各界的踊跃参与，巴西非政府论坛和巴西可持续发展工商理事会等非政府组织扮演了重要角色，巴西的库里提巴市被誉为世界可持续发展城市楷模。

二、树立新的资源观

资源观问题是一个基本理论问题。所谓资源观，指的是人们对资源问题的根本性的看法。一切与资源的探索与评价、规划与配置、保护与管理、开发与利用等相关的工作，都受着资源观的显著或潜在的影响，不同的资源观导致不同的社会行为，带来不同的效果。适应可持续发展战略应有新的资源观(吕国平 2001)。

1. 资源的时代观

资源观以人与自然的认识为基础，随着时代前进。人与自然关系经历了天命论、决定论、或然论、征服论等多个阶段才进入协调论的今天。人类从经济增长时代、发展时代进入可持续发展时代。早期人类在资源上的社会行为主要是开发、利用、消耗资源，谋求社会财富总量的增长。而后，人类注意到了资源的结构性短缺，强调在总量增长的同时重视结构的调整，形成发展的概念。人类不仅开发利用资源，而且注意到了资源配置。计划和市场等配置资源的机制选择，成为近代的焦点。现代经济学主要研究具有稀缺性的资源及其配置问题。现代资源的总量和结构都发生了短缺，环境问题也凸显出来，必须保持经济社会与资源环境的协调。走“可持续发展”道路，不但要求节约利用、合理配置资源，而且要对资源进行保护建设。对资源保护和更新建设，就成了可持续发展时代新的特征。

2. 资源的地位观

人口、资源、环境是可持续发展三大要素。人口的规模，生活的质量和生存空间的展布，归根结底取决于资源的承载力与分布。环境问题主要根源于人类对资源的利用是否合理和资源的自然变异是否符合于人类社会生存发展的要求。因而在“人口—资源—环境”三者中，资源处于基础的地位。不仅现在而且历朝历代，调整人与资源(特别是土地)间的关系，一直都是社会革命与经济建设中的基本问题。资源短缺形势的严峻性，已成为威胁经济社会安全的根本因素之一。对于资源的争夺，无论是战争的方式，还是市场竞争的方式，从来都是国际间政治与外交的焦点。资源的基础地位，时刻不能

忽视。

3. 资源的辩证观

辩证地看待资源，对于正确地制定资源政策具有极端的重要性。

1) 资源系统是开放的，人类认识、利用资源的潜在能力是无限的。因此资源又具有相对无限的特点。人们既不要单纯持资源有限的看法而悲观，也不能片面地持无限性的看法盲目乐观。辩证地分析资源，保持谨慎乐观的态度。

2) 要辩证认识资源大国与资源小国问题。我国“地大物博”，但又“人多物薄”。我们既要看到宏观资源潜力巨大，坚定发展的信心；又要清醒地认识到在微观上人均可利用资源短缺，以增强忧患意识和节约利用资源的意识。

3) 要辩证认识资源的开发和保护问题。不利于开发的保护是无意义的，不做保护的开发是不可持续的。我们只能将开发和保护融为一个过程，在开发中保护，在保护中开发。

4) 要辩证认识资源的量与质的问题。资源品质既决定于天然禀赋，又决定于技术经济水平。由于资源优劣差距很大，我们不能像以往简单地以各类资源总量来反映资源国情，而要以一定技术经济尺度对各类淘汰资源进行标准计量，真正对资源家底心中有数。

4. 资源的系统观

常有这样的现象，上游开荒或采矿破坏植被水土流失，导致中游河床淤积，进而危害下游入海口鱼群的生存。不同资源之间紧密关联，成为资源大系统中的一个子系统。系统观要求我们不能孤立地只就某个资源来论及资源管理保护。按系统论基本原理，一方面资源系统自身的动态平衡是维持该系统可持续存在的基础。另一方面各资源系统所施加的影响要适应资源环境自然系统的功能释放、更新与调整的能力；资源环境系统提供给人类社会系统的功能要符合于人类社会维持生存发展的基本要求。这条系统间的功能耦合原理，便是人与自然关系的协调原则。系统间的功能耦合，系统内的动态平衡，是经济社会与资源环境协调发展最基本的原理，是可持续发展战略的必然要求。

5. 资源的层次观

资源系统是可以进行纵横双向划分的矩阵系统，具有重要的层次性。自然资源既可以横向分为土地资源、水资源、海洋资源、矿产资源、物种资源、气候资源等 10 多种；又可以从纵向按照人类利用的不同而分为物质资源、能量资源和信息资源等多个层次。农业社会人对自然资源的认识仅到物体的程度。工业革命通过机械把物质转化为能量，利用煤和石油等新能源，把资源利用提高到分子、原子的水平上。工业社会后期人们开始利用原子能，资源利用提高到了原子核的水平上。现在新技术革命使人类对自然的认识达到微电子的程度，计算机技术使信息资源得到了广泛、深入和高效的利用。我们不仅要注意到资源各个子系统之间的相互关系，建立资源系统的良性循环；同时还要注意到资源系统利用层次随社会发展和科技进步而发生的动态演进。历史证明，每递进一个资源利用层次必然带来一次资源利用效率的大提高，必然带来一次资源

利用领域的大拓展。

6. 资源的发展观

资源的矛盾运动是发展的内在动力之一。当前我国以水、土为核心的农业资源接近承载力的临界状况，工业所需的多数大宗矿产出现短缺供不应求。我们是在形势最为严峻的资源基础上，承载着世界上最多数量的人口去追求可持续发展的。一方面要把资源节约型的国民经济体系建立起来，在生产中节地、节水、节能、节材，在生活中勤俭、适度消费并采取合理的消费结构；另一方面要高度重视开发利用和建设新的资源。只有领先科技进步特别是高新技术的发展，才能真正做到开源与节流并重，才能促进资源利用层次的深化，进而带来资源利用交流的提高、资源利用结构的完善和资源利用前景的扩展。这是解决资源矛盾的必由之路，是可持续发展时代资源的发展观的根本内容。

7. 资源的开放观

资源系统是开放的，不同地区之间的资源具互补性和动态交流的必然要求。地区封锁不利于资源优势互补；部分分割不能动态优化合理配置资源。西部大开发，要求各种必要生产资源要素向西部大流动、大集中、大组合。应以开放统一的资源供应系统和需求市场体系为支撑，有优惠明晰而稳定的政策环境。全球经济一体化，推进了世界资源供应体系和需求市场的开放；不同资源借助于不断扩大的开放日益发挥互补效应。我国加入世贸组织，为资源的开放流动打开了闸口，既“引进来”又“走出去”，全方位地对内对外开放，有利于合理利用国内外两个市场两种资源。

8. 资源的价值观

过去资源不被当作资产，资源无价，资源性产品低价，加剧了资源过快消耗。在可持续发展时代必须进行资源更新建设和保护，资源的价值属性日益凸显出来。只有树立资源的价值观，才能有利于理顺资源产业链的相互关系；才能合理进行资源的价值核算并纳入国民经济核算体系；才能科学地建立资源租税费体系，依法有序地实现资源的各种权益；才能科学地确定资源性资产的运营监管体制，并逐步建立起一套在市场配置资源基础上的宏观调控机制。

9. 资源的伦理观

规范人类在资源上的社会行为，最普遍有效的自律机制是确立适于可持续发展要求的资源道德伦理。人们常会碰到“资源无价尽可无偿使用”、“资源无限尽可随意取用”、“资源无主、谁用属于谁”等片面认识，这些社会意识支配下的资源行为及其反映出来的道德规范，显然已不能适应经济社会可持续发展的要求了。可持续发展时代，最主要的资源道德原则，是协调平衡原则和公平共享原则。合于这种原则为善，违背这种原则为恶。

协调平衡原则体现在自觉地优化配置、节约利用、注意保护、建议更新资源，以节约资源为荣，浪费资源为耻。

公平共享原则意味着以对资源公平共享为荣，以恣意独占为耻。“我们不是从双亲那里继承了地球，而是从子孙们那里借用着它”。要自觉地在当代与后代之间合理分配资源利益，自觉地在区域之间、国家企业个体之间合理分配资源利益。注意自觉地在促进经济社会发展与维持生态系统平衡间合理分配资源。

10. 资源的法制观

规范人们在资源方面的行为，一靠道德，二靠法制。资源市场配置及其宏观调控不仅要有规则，而且这些规则不定期要求有约束力和稳定性，必须加强法制。我国的资源法制建设在不断取得进展。但资源法制建设起步较晚；各个资源法律法规尚不免带有旧体制的(或新旧体制交错的)阶段特征；资源法缺乏成龙配套的系统性，立法动议多受既有部门的体制局限；有些法律甚至立法思想过于落后，不能适应发展的需要；现行法律之间有待协调的内容多，资源法律的执行情况尚不容乐观，等等。

加强资源法制十分紧要，推进资源立法更为迫切。首先应有系统地界定各种资源相互关系及管理基本原则的综合性资源法律。其次要分类对待资源本体的管理立法，规定资源权益的配置。再次要形成相应的资源产业法律系列，对资源利用、消耗行为立法。

资源立法既要贯彻法制统一原则，立法决策与改革开放发展决策相结合原则，立、改、废、编共同推进原则，立法与执法能力同步建设原则等；又要贯彻资源的利用、配置与保护建设统筹兼顾原则，节约优先原则，市场开放原则，代际公平与区际公平原则。要系统考虑不同资源之间的相互关系，明确利用一种资源时对其他资源的影响限度。要建立公共资源社会分配的法律约束机制，注意不同主体权益平衡。要对不同资源在不同时期不同情况确立不同的资源用途优先，采取用途管理制办法。要掌握经济利益与资源效益的平衡，建立资源补偿与动态平衡制度。要全面监督各种主体，约束公共资源配置行政权力。资源立法还要注意阶级性和全球性，在国内战线维护贫穷人群的资源利益；在国际战线维护贫穷(发展中)国家的资源利益，等等。

三、发展知识经济

1. 什么是知识经济

古今中外，一些哲人、思想家和经济学家都对知识、科学技术在推动社会经济发展中的作用给予了充分的肯定。培根的名言“知识就是力量”影响人类几个世纪；马克思的“科学技术是生产力”的科学论断，将科学技术的作用提升到一个新的高度；邓小平的“科学技术是第一生产力”的创造性见解，再次把科学技术对于人类社会生产力的重要性凸现出来。当人类进入 20 世纪之末时，一种以知识和高新技术为支撑的新型的经济形态——知识经济正向人类走来。

1990 年联合国研究机构首次提出知识经济的说法。国际经济合作与发展组织(OECD)于 1996 年对知识经济的内涵进行了简明扼要的概括：知识经济是指建立在知识和信息的生产、分配和使用之上的经济。该组织认为，一个区别于农业经济、工业经济的新的经济形态正在开始兴起。知识经济一经提出，在全球引起强烈反响，成为经济理论界当前研究的热点问题。对于知识经济，目前还没有一个完全统一的定义，许多学者

从不同角度提出了自己的看法，但基本上包含以下要点：① 以知识和信息的生产、扩散、分配和应用为基础；② 以创造性的人力资源为依托；③ 以高技术产业为支柱；④ 以创新为灵魂；⑤ 以知识和信息的占有为价值体现。

2. 知识经济形势下资源开发利用的变化趋势

知识经济完全不同于人们所熟悉的农业经济和工业经济(或称资源经济)，是一种全新的经济形态，它出现后将对在工业经济时代所形成的价值观念、资源配置、经济结构、分配方式、管理政策等一系列“游戏规则”提出挑战，甚至重构一套新的“游戏规则”。知识经济的到来使得资源的开发利用发生了如下的变化趋势。

(1) 空间变化趋势

垂直方向上表现为从地表向外层空间发展和向地球深部发展的趋势。水平方向上表现为由陆地到海滨，由大陆架到深海远洋开发的趋势。

(2) 种类和数量变化趋势

在资源的利用种类上，从早期的天然食物，农业自然资源发展到近现代的以工业资源(主要是矿产资源)、人力资源、资本资源为主的资源体系，到了知识经济社会，将主要利用智力资源、信息资源和可再生资源。从近 200 年世界矿业史来看，如果说 19 世纪是以煤、铁等基础资源为象征，20 世纪以石油、铝、铜、镍等为象征，那么 21 世纪对矿产资源的利用则是以非金属、稀有金属、稀土金属的广泛利用为标志。下世纪，传统工业在整个经济中所占比重越来越小，传统资源的使用数量会逐步减少，信息技术、新型材料、生命科学技术、空间技术等新兴产业不断发展壮大，其产品也向体积小、重量轻、耐腐蚀、耐高温、高强度等方向发展。非金属矿物、稀有金属、稀土金属以其自身的特性成为尖端技术不可缺少的重要原料。新材料、新技术可极大地改变人类对传统矿产品和木材材料的依赖程度，新材料的出现将节约大量的矿产和森林资源等。知识经济时代，人类将有能力用新资源和可再生资源来代替稀缺资源。

(3) 综合利用趋势

自然资源的多宜性特点决定了从单一利用向综合利用的转变趋势。由于技术条件的限制，很长时间内，大量多组分资源被当作单一资源加以利用，致使许多有极高价值的有用组分被浪费掉，这在矿产资源的开发利用方面表现尤为突出。随着地质勘探水平和采、选、冶技术的提高，矿产资源的综合利用率有了很大的提高，这一方面增加了资源的价值，另一方面也使一些低品位矿得以开发利用。另外，对自然资源的开发利用从追求单一的经济效益开始向经济、生态、社会效益并重的方向转变，对自然资源的可持续利用已成为必然趋势。

(4) 能源利用方式与技术变化趋势

在能源利用上，从传统能源向新能源和可再生能源转变。环境恶化和石油危机的出现，迫使人类开始重视新能源和可再生能源的开发利用。在下个世纪，燃煤高效联合循环技术将被广泛采用，煤的液化、气化将实现产业化；核能将进一步获得发展，并将大力开发水电；太阳能、生物能、潮汐能、地热能、风能等可再生能源的利用效率将大幅

度提高。到下世纪中叶，受热核聚变技术可使“海水变汽油”成为产业化，并将以最理想的方式解决人类对能源的需求。

3. 发展知识经济的措施

据专家估计，知识经济从形成、成熟到真正进入知识经济社会，至少得经历 20 年或更长时间。每个国家因其历史背景不同而有着不同的步伐。但任何国家都应为知识经济时代的到来及早做好准备。为此，应采取如下措施：

第一，增强国家的宏观调控能力。实践证明，美国知识经济的发展与其政府的政策调控是分不开的，这已是国际学术界的共识。1993 年 2 月美国总统克林顿上台之初就提出了《技术为美国经济增长服务：加强经济实力的新方针》，明确指出经济发展要靠高技术，并采取一系列具体措施。由此可见，发展知识经济，政府的倡导、规划、激励和调控是必要条件。国家的宏观调控能力表现在：中央财政占 GDP 的比例；自然资源合理、高效利用的宏观调控；外资引进的导向能力；进入信息高速公路的统一领导；重大基础科学研究项目的国家投入。第二，加强政府部门科学决策的能力。政府宏观调控的导向是建立在科学决策的基础上的，美国贝尔实验室前总裁伊恩·罗斯博士在题为《美国的衰退与国家技术政策》一文中说得好：“一个落后的国家可以从无到有地发展高技术产业，一个先进的国家也可以从有到无地丧失高技术产业。”关键在于决策的科学化、民主化、系统化和程序化。第三，大力发展教育，开发人力资源。人是知识和信息最重要的载体和最活跃的因素，没有人才就没有知识和信息。发展知识经济就要重视教育、重视人才，这一点对发展中国家尤其重要。对于教育的重要性已无人再有疑义，关键是一方面要保证教育经济的增长和多渠道投入的实现，提高教育质量；另一方面，要运用市场机制，盘活现有人才“存量”，合理调配人才，提高人才待遇。第四，创建符合本国实际的国家创新体系。一般来说，国家知识创新体系分为知识创新系统、技术创新系统、知识传播系统和知识应用系统，不同的国家其国家创新体系不尽相同，但其对国民经济持续发展的支撑作用均日益增大。面对激烈的国际竞争，国内资金相对短缺、科学技术相对落后的发展中国家应坚持有所为有所不为，精心选择切入点，集中力量加以突破，迅速实现科技成果的转化，形成高新技术产业，打开和占领国际市场。第五，发展知识经济必须加强国家知识基础设施建设。国家基础知识设施包括以下 4 部分：① 载体，即高素质、高技能的人作为知识产生、扩散和应用的载体；② 主体，知识机构，包括企业、学校、研究院所和中介服务，知识生产、扩散和应用的主体；③ 建立渠道，以知识网络来改变教育和知识的交换，使更多的人参与知识网络学习，促进各方面知识的转移和信息的转移；④ 电信基础设施，包括电视、广播、通讯、信息高速公路以及容易使大众参与信息和知识共享的技术手段等。

我们相信，在努力发展知识经济和实施可持续发展战略的 21 世纪，资源和环境生态问题将不再困扰人类，人类不仅拥有富裕的经济生活，同样也将拥有碧水和蓝天。

第十一章　自然保护生态学

由于人类干扰，自然生境被破坏，许多物种消亡，生态环境亦日趋恶化。自然保护已成为人类面临的重大问题之一。自然保护生态学(conservation ecology)应运而生，它是一门既面向当前危机、又着眼长远生态前景的、以生态学的思维来研究自然环境和自然资源发展的动态和问题的新兴学科。自然保护最基本的内容就是保护生物多样性，即遗传多样性、物种多样性和生态系统多样性(邬建国　1992)。保护自然，拯救濒危物种，维护生物多样性已是举世瞩目的重大课题。建立自然保护区、生物庇护所或自然公园是自然保护的最有效的途径。自然保护生态学的理论和实践尚处于萌芽状态，其迅速发展和尽快成熟尤为迫切。

第一节　自然保护生态学概论

人类文明已经有了五千多年的历史，从农业文明到工业文明，进而又正向后工业文明迈进。人类文明每前进一步，都会给人类带来巨大的生产力，包括物质的和精神的两个方面，从而使人类自身进一步得到解放。回顾人类社会的发展史，人类展开科技的双翅飞上天空，潜入大海，足迹几乎遍及地球的每个角落。但在阵阵凯歌声中，人们发现了不和谐的杂音，这就是人类生存环境恶化的警报。这警报声逐年增大，引起了人们的警觉。面临着生态系统退化、人口急剧膨胀、物种大量灭绝等一系列严峻的问题，面对着我们只有一个地球的现实，人们不禁对过去利用和征服自然的方式提出了疑问，我们应当如何利用自然才能保证千秋万代的生存环境和发展潜力？人类社会的发展像一柄利剑，既可能损伤自然又可能危及人类自身的生存。然而，人类的存在和发展又是历史的必然。

人类在困惑中不断思索。1972 年联合国人类环境会议终于在斯德哥尔摩召开，会上提出了“人类只有一个地球”的口号，标志着人类自然保护意识的开始。1980 年第十五届国际自然与自然资源保护同盟(IUCN)大会拟定并通过了《世界自然资源保护大纲》，它又一次强调了保护自然资源对人类生存和维护资源本身持续发展的重要意义，强调经济发展与自然保护两者协调起来并把策略和方案作为战略大纲要求纳入各国经济发展计划中去。1987 年 4 月，世界环境与发展委员会向全世界公开发表了一份题为《我们共同的未来》的长篇报告，该报告引用大量历史资料和统计数字，全面阐述了当今世界面临的 16 个严重的环境问题，提出了解决人口、资源和环境之间矛盾的可持续发展思想。1992 年 6 月举行的联合国环境与发展大会上，153 个国家和地区签署了《21 世纪议程》、《生物多样性公约》、《气候变化框架公约》等文件，确立了可持续发展战略是人类面向 21 世纪的共同选择，从而使保护自然环境和自然资源成为世界范围内的联

合行动。

一、自然保护生态学的涵义

1. 自然保护

自然保护就是保护人类生活中的自然环境和自然资源，其中心任务是保护、增殖(可更新资源)和合理利用自然资源。自然保护的目的是为了给当代和后代人建立最舒适的生活、工作和生产环境，以保证经济的持续发展和社会的繁荣进步。自然保护是通过对自然资源和环境采取一系列的合理管理措施来实现的。

尊重自然、保护自然是人类对待自然界应该采取的正确态度。但是，尊重自然并非去作自然的奴隶，任凭自然的摆布，听之任之；保护自然并不意味着保持自然的原始状态，不许人们去触动它。保护自然是发展生产力的基础，是最有效的、最充分的利用自然资源，并使可更新资源达到永续利用。自然保护除了进行严格保护的少数地区和对象以外，一般是在合理利用改造过程中进行保护，不仅使它的自然生态机制能正常地起作用，而且达到持续发展的目的，因而保护的概念已不是单纯的、消极的保护，而是综合的、积极的保护行动，它不致因为人们的利用改造而遭到瓦解，造成生态平衡的失调，并力求达到永续利用的目的。正如自然保护先驱者 Leopold 所说："严格说来，自然平衡早已打破。…… 我们惟一的选择，是根据具体的土地利用状况，客观地、因地制宜地去创造新的平衡。"

2. 自然保护生态学

自然保护生态学是近年来迅速发展的高度综合、多学科交叉而又相对独立的应用生态学的一个新领域，它是自然保护科学中的核心学科。人地关系的恶化所产生的诸多资源环境问题是自然保护生态学产生的直接原因，因而其目的就在于为保护自然环境和自然资源提供理论基础和实践途径。

自然保护生态学是研究受保护的物种和生态系统的特点，这些物种和生态系统自身之间以及它们与人类之间的相互作用的生态机制，以及如何保护这些物种和生态系统的一门学科。它集基础科学和应用科学特点于一体，同时既面向当前危机，又着眼长远生态前景，为自然保护科学开辟了广阔的前景。

自然保护生态学是多学科高度综合的产物，这些学科涉及生态学、生理学、环境监测学、生物地理学、自然资源学(森林学、水资源学、野生动物生物学、土地资源学等)、自然地理学以及社会科学和管理科学等。自然保护生态学是应用生态学的一个分支学科。应用生态学的其他分支学科，如干扰生态学、景观生态学、恢复生态学、生态工程学、森林生态学、农业生态系统生态学等学科的基本理论，必将对自然保护生态学的发展和完善起重要作用。

3. 自然保护生态学的主要保护对象

自然保护就是保护自然环境和自然资源。自然环境和自然资源在某种意义上讲是同义语，从生态学观点看，自然环境是由许多生态因素组成，如水、气、土、生物是环境

组成的因子。自然资源是指在特定历史条件下，人类能够从自然界中取得并加以利用的一定的物质和能量。从资源学观点看，水、气、土、生物就是资源。那么可以说自然环境是由许多自然资源组成，至少自然环境包括了自然资源在内。因此，自然保护就是对自然环境和自然资源的保护，从这个意义上说，保护自然环境，就是保护自然资源。

自然保护并不是针对所有的自然环境和自然资源，而主要是针对濒危的、脆弱的物种和生态失调、严重污染的生态环境或生态系统而言。自然保护最基本的内容就是保护生物多样性，即遗传多样性、物种多样性和生态系统多样性。自然保护不仅要保护原始的和接近原始的自然景观，保护濒危的物种及其生态系统，而且要努力把人类活动造成的生态失调、污染严重的生态环境改造成为对人类有益的环境。自然保护的目的就是保护人类生存和发展依赖的自然环境，保持经济的持续发展和保护良好的生态环境，这不仅符合当代人民的要求，而且也符合子孙后代的利益。

自然保护生态学的主要保护对象有：① 保护人类赖以生存和发展的生态过程和生命支持系统(如水、土、光、热、气等自然因子系统，农业生态系统，森林、草原、草地、淡水和沿海等生态系统)，使其免遭破坏和污染；② 保护生物多样性，保证生物资源的永续利用；③ 保留自然历史纪念物(如瀑布、火山口、陨石、地层剖面、山洞、古生物化石以及古树名木等)；④ 改善生态失调、污染严重的生态环境(如防治水土流失、治理土地沙化等)。

二、研究自然保护生态学的意义

自然保护生态学的实质就是利用生态学原理，研究人类与环境的相互影响并协调人类与生物圈的相互关系。自然保护问题小则涉及一个地区、国家的发展，大则关系到整个地球的保护。这是一个带有全局性和长远性的问题。显然，加强自然环境保护具有明显的战略意义。

1. 自然保护是经济发展的基础，二者互相依赖，互相促进

长期以来，在实际工作中，人们往往重生产轻生态，重开发利用轻自然保护。这是传统认识上的片面性。利用资源发展经济，关系到人们的直接利益，无疑应当重视。保护环境，保护人类生态系统，不仅可以创造物质财富，而且关系到人类长远的根本利益，同样更应该受到重视。自然环境一旦破坏以后，恢复很困难，有些情况下甚至是不可逆的。

环境对经济的促进作用，主要表现在保护环境可促进生态系统良性循环，使资源的再生增殖能力大于经济增长对资源的需要。相反，环境对经济也具有制约作用，主要表现为环境受污染与破坏后，不仅使社会受到巨大的经济损失，而且环境资源的枯竭，使经济发展受到限制。

保护自然环境与发展经济是相辅相成的。自然资源是经济发展的物质基础。保护好自然环境，才能保证拥有可以持续利用的资源，为经济发展持续不断地提供坚实的物质条件；加强科学的自然环境管理，既可以提高资源的综合利用率，又可以变废为宝，化害为利；合理的环境规划，既可以保证经济规划的实现，又可以减少环境污染的负效

应，从而提高经济效益。经济发展为自然保护提供动力来源。实施自然保护和环境治理需要知识、人才和资金。只有经济的飞速发展，才可能有更多的资金保障，才有可能推动科技的进步、人才的不断涌现。

2. 保护自然是精神文明建设的重要内容

保护自然不仅是经济发展的物质基础，而且是精神文明建设的重要内容。随着社会主义现代化建设的发展，人民不仅要求有富裕的物质生活，而且要求有充实的精神生活，要求有良好的生活与工作环境。而只有切实保护大自然，才能满足人们的这些精神需求。另一方面，丰富多彩的大自然还是文学、美术、音乐、电影等多种艺术形式取之不尽的源泉。热爱大自然，爱护有益动植物的风尚已成为社会文明与进步的标志。

3. 自然保护区为人类提供生态系统的天然“本底”

各种生态系统是生物与环境间长期相互作用的产物。现今世界上各种自然生态系统和各种自然地带的自然景观，正在迅速地遭到人类的干扰和破坏。为了研究这些地区的自然资源和环境特点，不得不借助古代的文献记载、考古材料、自然界残留的某些特征(诸如孑遗的生物种类、土壤剖面、地貌类型等)和古生物学的研究资料，来推测已不复存在的自然界的原始面貌。而在各种自然地带保留下来的、具有代表性的天然生态系统或原始景观地段，都是极为珍贵的自然界的原始“本底”，它对于衡量人类活动结果的优劣， 提供了评价的准则，同时也对探讨某些自然地域生态系统，今后合理发展的方向，指出了一条途径，以便人类按照需要而定向地控制其演化方向。

4. 自然保护区是各种生态系统以及生物物种的天然贮存库

现今世界上究竟有多少物种，直到目前还不太清楚，尽管生物分类学家们在研究物种方面进行了大量的工作，但由于多种原因，迄今对生物种类的划分还缺乏系统可靠的资料。 可见，大自然为我们蕴藏了丰富的生物资源。生物资源是人类获取生活和生产原料的基本来源。人类利用生物品种的历史证明：我们不能预言哪一种生物将对我们有用。有些似乎最无用的物种，突然会变成医药、工业、农业和科学研究方面有用的甚至是不可代替的原料。随着科学技术的发展和人类需求的不断提高，许多过去从未用过的野生物种， 将陆续被人类发现它们在工业、农业、医药以及军事方面的新用途。但遗憾的是由于人为干扰和自然环境的改变，许多物种正在迅速地遭到灭绝。有些物种在未深入研究它们的用途之前，甚至还未来得及定名，就濒于灭绝或已经消失。而自然保护区的建立和合理管理，将有助于这些生物的保护及其繁衍。从这个意义上说，自然保护区无疑是一个物种资源及生态系统的天然贮存库。

5. 自然保护区既是科研的天然实验室，又利于培养人类的环境意识

自然保护区中的核心区里有丰富的物种和完整的生态系统，为进行有关生态学的研究提供了良好的基地，成为设立在大自然中的天然实验室。由于自然保护区保护的长期性和天然性的特点，对于进行一些连续的系统的观测和研究，提供了特别有利的条件。

自然保护区除核心区是为进行科研而设置的绝对保护地域外，其他地域一般都可以

接纳一定数量的游客、学生到保护区进行参观游览。自然保护区是天然的大课堂、活的自然博物馆。通过游览保护区，可以增加有关生物、地学方面的知识。在展览馆可以通过模型、图片、录音等设施，宣传有关自然和自然保护的知识。这些途径可以有效地培养人们的环境保护意识。

第二节　生物多样性

随着人口的迅速增长，人类经济活动的不断加剧，作为人类生存最为重要基础的生物多样性受到了严重的威胁。生物是人类食物、药物和工农业生产原料的基本来源。随着生产的发展和技术的改进，它们正在遭到过度的开发利用。许多地方不但生物资源已陷入枯竭的境地，而且它们所栖息的生境也在不断恶化，使它们再难以恢复起来。如果这种趋势再继续发展下去，诸如森林大量砍伐、草地开垦退化、湿地减少、沙漠化和盐渍化发展、水资源枯竭和环境污染等得不到防止，在未来 20 年中将是晚白垩纪(距今约 6500 万年)以来，物种大量消失的时期。科学家预测到 2050 年，地球上将有四分之一的物种灭绝，从而威胁到人类自身的幸福和生存。20 世纪 80 年代初以来，有关生物多样性国际会议频频召开，1992 年，世界资源研究所(World Resources Institute)和联合国环境规划署(UNEP)出版了《全球生物多样性策略》，使得生物多样性保护在全世界受到重视。尤其是 1992 年在巴西召开的“环境与发展大会”，120 多位国家首脑签署了“联合国生物多样性公约”，使全球生物多样性保护和研究工作进入了新阶段。

一、生物多样性的基本概念

生物多样性是地球上所有生命的总和，是 40 亿年来生物进化的最终结果。它是多样化的生命实体群的特征。每一级生命实体基因、细胞、种群、物种、群落、生态系统等都存在着多样性。生物多样性是一个描述自然界多样性程度的内容广泛的概念，它是时间和空间的函数，因此它具有区域性。故有人将其解释为一定空间范围内多种多样活有机体(动物、植物、微生物)有规律结合在一起的总称。它既是生物之间、生物与环境之间复杂关系的体现，也是生物资源丰富多彩的标志。

生物多样性一般认为有四个层次，即基因水平、物种水平、生态系统水平和景观水平，相应地有四种生物多样性。

遗传多样性(genetic diversity)也叫基因多样性(gene diversity)，是指种内基因的变化，包括种内显著不同的种群间和同一种群内的遗传变异。种内的多样性是物种以上各水平的多样性的最重要的来源。遗传变异、生活史特点、种群动态及其遗传结构等决定或影响着一个物种与其他物种及其环境相互作用的方式。基因是一种遗传信息的化学单位， 它能从上一代传到下一代。遗传多样性大都发生在分子水平和基因水平，并且都与 DNA 的理化性质紧密相关。

物种多样性(species diversity)是指物种水平上的生物多样性。它是用一定空间范围物种数量和分布特征来衡量的。一般来说，一个种的种群越大，它的遗传多样性就越大。 但是一些种的种群增加可能导致其他一些种的衰退，而使一定区域内物种多样性

减少。物种多样性主要是从分类学、系统学和生物地理学角度对一定区域内物种的状况进行研究。物种多样性的现状，物种多样性的形成、演化及维持机制等是物种多样性的主要研究内容。物种水平的生物多样性编目工作是一项艰巨而亟待加强的课题，也是了解物种多样性受威胁程度的有效途径。目前我们对地球上物种的数目都难以确切估计，有的说是 500 万至 3000 万种，有的说有1 亿种以上。即使是目前已经定名或描述的物种数目也不十分清楚，一般认为有 140 万~170 万种。要想搞清楚这些问题，困难较大。另外，物种的濒危状况、灭绝速度及其原因，生物区系的特有性，如何对物种进行保护等都是物种多样性研究的内容。物种多样性的大小并不仅仅是与物种的数目有关，还和各个种的数量、分布、相互之间的关系有关，因此，物种多样性的测度比较复杂，有多种多样的方法。

生态系统多样性(ecosystem diversity)是指生物圈内生境、生物群落和生态过程的多样化以及生态系统内生境差异以及生态过程的多样性，这里生境主要指无机环境，如地貌、气候、土壤、水文等。生境多样性是生物群落多样性甚至是整个生物多样性形成的基本条件。生物群落多样性主要指群落的组成、结构和动态方面的多样性。从物种组成方面研究群落的组织水平或多样化程度的工作已有较长的历史，方法也比较成熟。在生态系统内部，也有学者用生物量来描述其多样性的，它包含了生态系统中各种生物数量比例的差异，也反映了生态系统结构和功能的多样化。根据世界保护联盟的估计，各种生态系统平均每平方米有 6kg 生物量，其中 89%是高等植物，7.7%是藻类、真菌和细菌等低等植物，动物只占 3.6%。植物多样性是动物多样性进化和保存的基础，它也决定着动物多样性的高低。生态系统的类型变化也是生态系统多样性研究的重要内容。有些生态系统有它的独特性，一旦遭到破坏，再也恢复不了，也就是说该类系统将在地球上消失， 所以要特别加以保护。

景观生物多样性(landscape diversity)，它主要是研究地球上各种生态系统相互配置、景观格局及其动态变化的多样化。这一类生物多样性也逐步得到人们的重视，因为对它的研究，对土地利用规划、农林牧合理配置、景观设计、城市规划等项工作有指导意义。景观多样性研究受到地理学者的关注。

二、生物多样性的重要性

不论怎样或从什么角度来评价生物多样性的重要性，归根结底它的重要性体现在对人类的有用或有益性，人类的目标是谋求社会经济的持续发展，要达到这一目标，关键是要保护好地球的生命支持系统。这个支持系统的核心就是生物多样性(张金屯 1999)。

生物多样性的价值首先在于它是可供人类利用的自然资源，即生物资源，包括植物、动物和微生物，再加上受生物影响的环境资源。生物资源不同于非生物资源，如果保护得法，利用得当，则是可再生的，因此，在持续发展中有着重要意义。

1. 生物多样性的直接经济价值

人类靠生物多样性为生，没有生物，特别是植物，人类就无法生存。事实上，人类

生活水平的提高是建立在利用生物多样性的基础之上的。

食用方面：人类已使用大约 5000 种植物作为食物，但只有 150 种进入市场，30 种成为人们广泛种植的粮食，其中，小麦、水稻、玉米约占一半。所有的作物都是首先从野生种开始，逐步驯化而成为广泛栽培的种，这里面遗传多样性和物种多样性就起着重要作用。作物遗传多样性的中心一般是在生态多样性、栽培多样性丰富之地，例如地中海区域、墨西哥高原、中国中部等。这些地区可能是野生种首先被驯化之地，例如小麦、大麦品种多样性中心在埃塞俄比亚；西红柿品种多样性中心在墨西哥。在动物中，人类食用的少于植物，但是平均 1/3 的蛋白质是动物提供的(发达国家 55%，发展中国家 20%)。像农作物一样，动物品种也是驯化后成为饲养动物，这些动物的品种也非常多，遗传多样性非常丰富，人类未来食物结构的改进，生活水平的提高，有赖于人们发现新的高质量的物种，同时还取决于它们的遗传多样性。多样性丰富，人们才能从中驯化、培育出更好的品种。

医药方面：世界上许多药物都是从植物、动物或微生物中提取研究后，再加工生产的。许多动植物可以直接用做药。热带地区物种多样性特别丰富，是医药的重要来源。不少植物具有毒素，其正是药用成分，可以药用，比如萝芙木含有抗高血压的成分，长春花含有抗癌成分，大丁草含有抗蛇毒成分等。许多补药，如人参、党参等都是植物。动物中药用的也不少，比如蚂蚁、蝎子等。利用微生物制药的就更普遍，比如青霉素、四环素等都是微生物分泌的成分。人类已有许多种药，但还有许多治不了的病，这些病的根治，需要开发新的医药，生物多样性是其开发研究的基础。

工农业原料方面：生物多样性为我们提供了许多生产原料。植物提供的这样的产品非常多，例如橡胶、蜡、油脂、木材、纤维等。动物提供皮革、羽毛、丝、动物油脂等。无论在什么地方，工农业原料大多来自本地的生物资源。从全球来看，每年来自生态系统中的原料的贸易额非常巨大，仅木材每年交易达 770 亿美元。当然，原料的来源主要是发展中国家，发达国家对自己的原料、生物多样性主要是保护，而出资购买发展中国家的原料和生物多样性资源，从中我们可以体会到保护自己国家生物多样性的重要性。

2. 生物多样性的间接价值

生物多样性间接价值即生态价值和社会价值，间接价值有赖于直接价值，如果生物多样性自身创造的环境不复存在，则生物多样性就会逐渐消失，因而间接价值也就没有了。间接价值有以下几方面：① 维持全球气体平衡，植物制造氧气，吸收二氧化碳，动物消耗氧气，呼出二氧化碳，整个平衡体系靠生物多样性维持；② 光合作用，生产有机物质，成为整个地球的生命支持系统；③ 涵养水源，维持水循环，缓解减少自然灾害；④ 调节气候，保护农田，保护人类健康；⑤ 促进土壤发育，保持水土；⑥ 储存物质，并促进物质循环，维持地球上物质和能量的平衡；⑦ 吸收、分解污染物质，净化环境；⑧ 美学、娱乐价值，比如旅游。

3. 生物多样性的潜在价值

由于人类认识上的局限，我们难以预测未来会遇到什么问题，需要什么或如何去满

足这些需要，更无法确定哪些物种是有用的或有价值的。1979 年，在墨西哥一个小山地上发现了一个玉米的新种，但它不是一年生而是多年生。因此，研究人员预测，用它与现有的玉米杂交，可培育出多年生高产玉米，估计每年可创 68 亿美元价值。所以，生物多样性需要我们进一步研究，未来产生的价值难以估量。

我们知道了生物多样性的价值，尤其是它在持续发展中的作用，就不难理解保护生物多样性的意义了。

三、生物多样性的现状和问题

地球上现有多少生物种类，现在不十分清楚，一般认为在 1000 万到 1 亿种之间。已被科学家描述记载的有 140 万余种，其中昆虫约 75 万种，脊椎动物 4.1 万种，高等植物 25 万种，其他为无脊椎动物、真菌和微生物、藻类等（表 11-1)。每一个生物种都是大量的遗传信息贮藏者，细菌的基因数量约为 1000 个，真菌可以达到 10 000 个，而高等植物和高等动物都在 40 万以上，大量的遗传信息存于 DNA 分子之中。物种的数量

表 11-1　已被描述过的生物物种数量

种类	被描述过的数量	合计
病毒	1 000	1 000
原核生物界		4 760
细　菌	3 000	
黏原生质	60	
蓝藻	1 700	
真菌		46 983
接合菌	665	
子囊菌	28 650	
担子菌	16 000	
卵　菌	580	
壶　菌	575	
聚黏菌	13	
黏　菌	500	
藻类		26 900
绿　藻	7 000	
褐　藻	1 500	
红　藻	4 000	
金　藻	12 500	
甲　藻	1 100	
裸　藻	800	
高等植物		239 428
苔藓植物	16 600	
裸　蕨	9	
石　松	1 275	
木　贼	15	
蕨　类	1 000	
裸子植物	529	
双子叶植物	170 000	
单子叶植物	50 000	
原生动物	30 800	30 800
多孔动物	5 000	5 000
腔肠动物	9 000	9 000
扁形动物	12 200	12 200
线虫动物	12 000	12 000
环节动物	12 000	12 000
软体动物	50 000	50 000
棘皮动物	6 100	6 100
节肢动物		883 461
昆　虫	751 000	
其他节肢动物	123 161	
小无脊椎动物	9 300	
脊索动物		43 853
被囊类	1 250	
头索动物	23	
脊椎动物		
无颌类	63	
软骨鱼类	843	
硬骨鱼类	18 150	
两栖类	4 184	
爬行类	6 300	
鸟　类	9 040	
哺乳类	4 000	
总　计		1 383 485

及其代表性个体的遗传信息数量只构成地球生物多样性的一部分。每一个种都有许多个体所组成，比如 10 000 种蚂蚁在一定时间内有活个体 10^{15}。实际上没有任何两个个体的遗传基因完全相同，所以，地球上生物多样性还是很丰富的。但由于自然生态过程中，加上人类的活动，生物多样性的灭绝速度在大大加快，这是我们目前面临的重大问题。

人类对物种灭绝速度的影响可追溯到几千年以前，但自 20 世纪开始，人类的影响明显增加，目前，还没有准确的估计，到底有多少物种灭绝了，但毫无疑问，当今物种灭绝速度要比 200 年前快多了。已知鸟类和哺乳类灭绝速度在 1600~1950 年间增加了 4 倍。到 1950 年，鸟类和哺乳类灭绝速度每 100 年分别上升 1.5%和 1.0%。自 1600 年以来，大约有 113 种鸟类和 83 种哺乳动物已经消失。在 1850~1950 年间，鸟类和哺乳类平均每年灭绝 1 种。现在速度更快了。低等动物的灭绝速度更为惊人，由于热带雨林的破坏，每年约有近 5 万种无脊椎动物受到威胁，而趋于灭绝。高等植物每年至少消失 1 种。种类遗传变种和整个自然生态系统的消失速度比物种灭绝速度更快。全球热带森林，20 世纪 80 年代初，每年毁林 1140 万 hm^2； 80 年代末，每年毁林上升到 1700~2000 万 hm^2；90 年代已超过 2000 万 hm^2。拥有全球 50%的物种的栖息地热带雨林面积比原有面积减少一半。现在大部分国家的森林都成片断化，被退化的荒地所包围，森林维持生物多样性和重要生态过程的能力大为降低。生态系统多样性受到很大破坏，如果毁林继续下去，直到大部分森林消失，那么 66%的植物种和 69%的鸟类就要消失。目前的趋势继续下去，到 2020 年，非洲热带森林物种的损失可达 6%~14%，亚洲达 7%~17%，拉丁美洲达 4%~9%。如果毁林速度加倍，物种消失将增加 2~2.5 倍。这是用种面积曲线法预测出来的，是比较科学的。目前人们已知的濒危种和渐危种仅动物和高等植物就有近万种(表 11-3)。这些种已列在特殊保护的名单之中。

表 11-2　中国和世界的生物物种比较

类别	中国种数	世界种数	%
淡水藻	8979	20 130	45
地衣	<2000	约 20 000	约 10
苔藓植物	22 000	200 200	9.1
蕨类植物	2200~2600	10 000~12 000	22
裸子植物	约 240	850~940	26.7
被子植物	>30 000	>260 000	>10
鱼类	3862	22 037	17.53
两栖类	284	4010	7.08
爬行类	376	6300	5.97
鸟类	1244	8730	14.25
哺乳类	581	4340	13.39
无脊椎动物	73 422	1 224 409	16.68
昆虫	>51 000	>920 000	5.5

表 11-3　全球濒危种和渐危种数量

类 群	大 陆*	岛屿**	海洋	总计
哺乳类动物	159	48	9	216
鸟类动物	91	87	0	178
爬行类动物	41	21	6	68
两栖类动物	14	0	-	14
鱼类***	193(443)****	21	0	214(464)**
无脊椎动物***(昆虫纲)	138	239	0	377
无脊椎动物***(其他)	233	99	2	334
维管束植物*****	3985	2706	0	6691

引自 Reid　1989

*陆地面积大于 100 万 km^2(格陵兰的大小或更大)；**陆地面积小于 100 万 km^2；***主要是北美和夏威夷的代表；****包括维多利亚湖泊区 250 种丽鱼科鱼类濒危种；*****维管束植物(包括种、亚种和变种)。

湿地生态系统在地球上破坏也较严重，发达国家比如澳大利亚，新西兰和美国加利福尼亚湿地已消失了 90%。红树林在湿地中是破坏最为严重的，像印度，巴基斯坦和泰国至少有 3/4 红树林受到破坏。湿地破坏对生态系统多样性影响最大。

生物多样性受到威胁的原因有环境方面的，也有生物方面的，但最主要是人类活动的影响。归纳起来有以下几个主要方面：

1) 森林破坏。包括大面积的采伐、火烧、垦殖农作等。森林毁坏，生态系统受损，原有的生境不复存在，因此对原有的生物种类来说就是毁灭性的。生物多样性随着森林的破坏而减少在热带地区非常明显，最明显的是热带雨林地区。

2) 草地过度放牧和垦殖。如果说森林地区人们为了木材和粮食而导致森林破坏，大量野生动物灭绝，那么草原和荒漠地区，过度放牧和不合理的开垦则使大量植被受到破坏，沙漠化和盐碱化面积不断扩大，使许多物种灭绝。像甘草这样广布的种，都濒临灭绝。干旱地区环境一旦破坏，极难恢复，生物多样性消失速度比森林还快。

3) 生物资源过度利用。过分利用是导致物种灭绝的重要因素。在所有濒危、渐危和罕见脊椎动物中，大约 30%是由于过分利用而濒临灭绝的。许多毛皮兽如灰鼠、大水獭种群已下降到临界水平，大多是由于利用毛皮所致；非洲象在 1981~1987 年间从 120 万头下降到 76.4 万头，是因为利用象牙之故。许多药用植物也是如此，如人参、天麻、黄芪、罗汉果等，野生植株已非常有限了，如果继续采收，将灭绝。

4) 工业化和城市化发展。工业化和城市化的发展对物种的破坏是非常大的，它彻底改变了原有的生态系统和生境，对原有生物是毁灭性的。工业和城市发展，又造成严重的环境污染，比如酸雨、河流和土壤的污染等，对生物的灭绝起到了加速作用。城市草坪和造林的发展，种类单一，根本无法弥补物种的损失。

5) 外来种引进和侵入。外来种的引进和侵入使生态系统中原有种受到重大威胁。比如澳大利亚野兔、紫茎泽兰。栽培与推广单一的高产品种，人工林品种单一化都影响到生物多样性的质和量。

6) 无控制的旅游。无控制的旅游也是影响生物多样性的重要因素。另外还有灾难性的环境变化、病虫害的蔓延等也影响着生物多样性。

四、生物多样性的保护与持续发展

随着人口增加，工农业生产发展，自然资源开发加快，有些地方自然资源已呈现严重枯竭。因而各界人士呼吁要建立一个持续的社会，持续社会核心就是持续发展。一般说，持续发展是既能够满足现代社会需求，又不损害子孙后代需求的发展。也许这是难以实现的，并感到含义模糊，可作不同的解释。人类要发展，必然要消耗自然资源，有些资源无论你如何利用，利用时间有多长，最终会枯竭的，比如石油、煤炭等。因此，持续发展的实现只能寄托于生物资源的利用上，也就是生物多样性的保护和利用上。如前所述，生物多样性是人类赖于生存的基础，没有生物多样性，人类社会就不能发展。因此，保护生物多样性是持续发展的前提，如果保护得当，利用合理，可永续利用，以支持实现持续发展。反之，如果生物多样性保护不力，利用不合理，社会发展的基础就会削弱乃至消逝，那么持续发展就会成为空想。现在我们必须对持续发展和生物多样性保护之间的依赖关系有清醒的认识。发达国家已使用了地球上大部分生态资本，主要是生物多样性资源，这是因为他们对自己生物多样性保护的重要性认识得早。我国是一个长期实行计划经济体制的国家，经济发展是很快的，但持续发展问题没有解决好，尤其是对生物多样性保护认识不足。1998 年长江流域和松花江、嫩江流域的特大水灾是和长期的生物多样性保护不利有重大关系的，这一点必须引起高度重视。

持续发展并不是一个绝对的概念，而具有相对的战略含义。在自然资源的基础上，通过适当的措施，比如提高知识水平和技术能力，发挥人的聪明才智等，使资源利用率成倍增长或可循环利用，是未来持续发展的重要研究内容。人们要学会持续地生活，既要照顾自己目前的幸福，也要考虑子孙后代利益，要管理好地球。地球有它的限度，要合理地、持续地利用自然资源。目前人们滥用资源，破坏严重。要控制人口增长，现在地球上人口已超过 53 亿，地球的承受能力受到威胁。

从生态学上讲，一个持续发展的目标应体现在下列几个方面：① 物种和遗传多样性：应保持稳定，防止人为活动造成物种和遗传资源灭绝。② 生态系统和景观多样性：保持生态系统成分稳定和生态系统稳定，使每一主要生态区的自然生态系统不少于10%的面积，保持经营性生态系统生物多样性的持续利用。③ 保护生物多样性的同时，也要保护生物的生存环境。大气环境方面，限制大气污染物质排放，停止损害臭氧层，防止二氧化碳浓度升高；水质量方面：停止污染水域，保持水域生态系统的平衡。④ 不可更新资源：要提高利用率，限制开采量，以实现持续利用，同时要研究发掘新资源。

保护生物多样性是实现社会持续发展的一个重要方面，保护的目的就是持续利用，要做到持续利用就必须加强保护，两者不是对立的，是一个问题的两个方面。为了持续发展，我们必须从现在起做到：

1）保护和挽救生物多样性。这意味着要采取得力措施保护基因、物种、生态系统和景观多样性。通过保护生境，如建立保护区，挽救和保护生物多样性，防止重要的生态系统退化。目前，世界范围内的许多生物多样性关键地区已遭破坏，应尽量设法恢复这些区域的面貌。

2）研究生物多样性。研究生物多样性的组成、分布、结构和功能，了解基因、物

种和生态系统的作用和功能，阐明原生性生态系统及其演替系列之间复杂的关系，为持续发展提供依据。研究要分层次，从分子、细胞、个体、种群、群落与生态系统不同水平出发，对区域物种及其遗传变异的现状与发展，关键种的传粉生态、生殖生态、生态系统的结构和功能进行研究。研究新的生态型、基因型及生活型，以丰富生物多样性资源。

3) 持续利用生物多样性。要在科学研究的基础上，根据各地具体情况和要求，用于林业、农业、牧业、渔业、野生生物资源开发和综合规划发展中去，保证这些活动都符合社会经济持续发展的标准。

第三节　自然保护区

自然保护区在全球范围内的广泛建立，是当代自然资源保护和管理中的一件大事。19 世纪中期以前，自然保护区这个名词还不为人们所熟知。1872 年美国成立了第一个国家公园——黄石公园(Yellow Stone)，随后它就像雨后春笋在全世界不同国家、不同地域破土萌生。在 20 世纪 50 年代以后，自然保护区已经在全世界广泛设立，有些国家自然保护区的面积超过了国土面积的 10%，自然保护区的数量达到 1000 个以上。而且从目前的趋势看，全世界自然保护区的数量和面积仍在不断增加。自然保护区这一名词不仅已经家喻户晓，并且几乎变成了一个国家文明与进步的象征。

自然保护区是受保护的生物资源及其生态系统就地被保护的场所，它们的建立和有效管理是自然保护的重要战略举措。如何进行大范围的自然保护区的选址？自然保护区的设计原则又如何？如何进行保护区的建设、管理与评价？这些问题都是自然保护生态学所要探讨的。

一、自然保护区的概念和类型

1. 自然保护区的概念

自然保护区是为了保护各种重要的生态系统及其环境，拯救濒于灭绝的物种，保护自然历史遗产而划定的进行保护和管理的特殊地域的总称。在这些自然保护区中，既包括各种自然地带中各种生态系统的代表，又包括一些珍贵、稀有动植物品种的集中分布区，候鸟繁殖、越冬和迁徙的停歇地，以及饲养、栽培品种的野生近缘种的集中产地；还包括风光旖旎的天然风景区；同时也包括具有特殊保护价值的地质剖面、化石产地、冰川遗迹、岩溶、瀑布、温泉、火山口及陨石所在地等。此外，在传统的农业实践中创造出的一些成功地保护自然的范例，也属于自然保护区的特殊的保护范围。

2. 自然保护区的类型

自然保护区的类型取决于该特定地区、生态系统、物种或种组受威胁的程度，以及管理机构和当地的社会经济情况。一般将自然保护区分为以下 6 类：

1) 科学保护区/严格自然保护区。在不受外来干扰的自然状况下，通过保护自然及

其生态过程提供具有典型生态意义的自然环境，用来进行科学研究、环境监测和教育，在动态和进化状态下维护遗传资源的自然保护区。

2) 国家公园(national park)。1969 年在 IUCN 第十届全会上确定国家公园应具有相当大的面积，包括一种或几种基本上未受人类开发利用的、具有代表性的生态系统类型，并包括一定的自然景观以及以科学、教育和娱乐为目的而保护的具有突出的国家和国际意义的自然区和风景区。在这些地区禁止进行商业性资源开发。

3) 自然遗迹/自然纪念地：保护和维护具有国家意义的自然风貌和当地特征的保护区。

4) 自然保护区/野生生物禁猎区。确保和维护在自然环境中具有国家意义的物种、类群、生物群落，以及需要人类特殊管理、允许有控制地利用某些资源的地区。

5) 风景保护区。在保持当地正常的生活和经济活动的情况下，既保护居民和土地相协调的具有国家意义的自然景观，又为社会提供娱乐旅游场所的地区。

6) 多用途管理区/资源保护区。为综合利用和保护的自然资源，如水体、森林、野生生物、牧场和户外娱乐场所。

二、中国自然保护区的特点

1. 曲折的发展历史

世界自然保护区的建立始于 19 世纪晚期，全球第一个自然保护区——黄石国家公园于 1872 年在美国正式建立。我国的第一个自然保护区——鼎湖山自然保护区由中国科学院于 1956 年在广东省肇庆市建立。比黄石国家公园晚了近一个世纪。我国自然保护区的建立不仅起步较晚，而且经历了坎坷的发展历程。

(1) 萌芽时期

自 1956 年建立第一个自然保护区开始，经过了 10 年，我国的自然保护区才发展到 19 个。这主要是由于新中国刚成立不久，百废待兴，只是经过科学家呼吁“请政府在全国各省(区)划定天然森林禁伐区，保护自然植被以供科学研究的需要”，以及林业部门颁发的有关条例后，才逐步建立起自然保护区。这一阶段的自然保护区建设还停留在封山育林，抢救一批自然状态的森林以供科学研究为主要目的。对自然保护区建设的理论基础以及自然保护区更深层次的含义还没有系统研究，更不可能把自然保护区建设纳入国民经济和社会发展的计划之中。所以，这一时期的自然保护区无论在数量、还是质量上都处于萌芽时期。

(2) 停顿时期

1966~1976 年，整个中国处于政治动荡的非常时期，自然保护区的建设也因此受到冲击，基本处于停滞状态。这一时期不仅未建立新的自然保护区，相反在已建立的自然保护区中毁林开荒，乱采滥猎珍稀植物和动物的破坏行为屡有发生。有些自然保护区的管理机构职能难以发挥，甚至被迫停止工作。

(3) 蓬勃发展时期

自 1976 年以后，自然保护区的建立像雨后春笋般蓬勃发展，主要有两方面原因。首先是人口爆炸的压力对自然资源需求量的猛增，从而加剧了对自然资源的开发利用，有些地区则因利用过度而遭破坏，不仅在科学界对自然资源的保护愈加关注，一系列破坏资源的现状也引起了政府决策人员的重视。尤其是因环境破坏而造成的自然灾害及滥用自然资源而危及人民的切身利益的事件逐渐增多，促使人们对保护自然资源有了紧迫感。另一方面则因改革开放，加强了对外交流，自然保护区的建设与发展也因此而学习到许多新思想、新观点，促进了我国自然保护区的发展。至 1994 年，自然保护区的数量增加到了 766 处，总面积为 6618 万 hm^2，占国土总面积的 6.8%。其发展速度以及自然保护区的类型、管理水平等，与前两个时期相比真是天壤之别，大大超出了人们的预料(图 11-1)。所以把这一阶段称为蓬勃发展时期是再适合不过了。

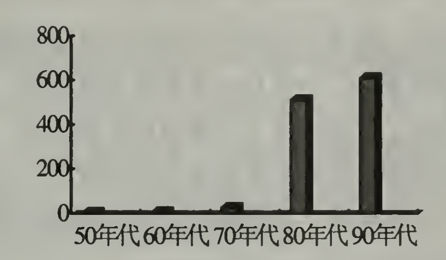


图 11-1　中国不同时期(20 世纪)建立的自然保护区数量

据统计，到 2000 年底，我国已建立自然保护区 1227 个，总面积 9820.8 万 hm^2，约占陆地国土面积的 9.85%，超过了国家确定的自然保护区占国土面积 9%的“九五”规划目标。与“八五”末期相比，全国自然保护区的数量和面积约分别增长 53%和 37%。其中，经国务院批准建立的国家级自然保护区已达到 155 个，面积 5751.5 万 hm^2，占国土面积的比例已近 6%，占全国自然保护区总面积的比例达到 65%。目前，全国已有长白山等 9 处自然保护区纳入了“国际人与生物圈保护区网络”，有 7 处保护区列入国际重要湿地名录，3 处被列入世界自然遗产名单。

2. 类型丰富多样

中国是一个具有独特地质历史的国家，在漫长的发展过程中，形成了多种多样的地形、地貌类型。喜马拉雅山运动的抬升形成了世界上最高而又最年轻的山脉，这里蕴藏着不少尚未被人所知的物种。在我国西南地区呈南北走向的横断山脉切割成的高山深谷，创造出许多地形奇观，成为无数动植物种在第四纪冰期到来时的避难所，为丰富的物种提供了生存条件，使许多珍稀物种不致因冰期来临而消亡。

我国地域跨越的气候带具有十分丰富的水热组合类型，从北到南依次出现寒温带、温带、暖温带、亚热带和热带。从东到西则有湿润区、半湿润区、半干旱区和干旱区。

上述各种自然条件的差异及相互结合，形成错综复杂的生物地理区域，为丰富多样的物种创造了得天独厚的生存空间。造就了各式各样的生态系统类型。就陆地生态系统而言，除赤道雨林外，几乎所有北半球的植被类型都可以在中国内地找到。动植物区系

也名列世界前茅，高等植物的数量居世界第三位，因此，为动物提供了栖息环境和食物来源。据统计，中国产有兽类 509 种，约占世界总种数的 12%，1186 种鸟类约占世界总种数的 14%，315 种爬行动物和 196 种两栖动物分别占世界总种数的 5%和 7%。

中国自然保护区类型丰富多样的特点正是基于上述条件而形成的。如果把生态系统分为陆地生态系统和水域生态系统两大类，我国就保护陆地生态系统而建立的自然保护区就包含了森林生态系统类型、野生动物类型、特殊植被类型、孑遗植物类型、自然景观类型等。保护水域生态系统类型的自然保护区包括海岸带和海洋生态系统类型、内陆淡水生态系统类型、湿地生态系统类型等。

保护特殊地质遗迹(包括古生物化石、古海岸带、特殊地质剖面、火山遗迹等)的保护区的建立又丰富了我国自然保护区的类型。

3. 分布不均

中国的自然保护区建设初期是从封山育林，划定天然森林禁伐区开始的，以致现今各类自然保护区的数量发展不平衡，以森林生态系统类型居多，自然形成向东南部湿润森林区倾斜分布的格局。当然，在东南部人口密集的沿海地区，人为活动频繁造成破坏的程度较高也是促进多数自然保护区在东南部建立的因素之一。相比之下，在占国土面积 1/3 的西北部半干旱和干旱地区，自然保护区的数量相对较少而出现的结构不合理、分布不均应该引起关注。

西北部地区是我国畜牧业发展的重要基地，许多特殊的草原与荒漠类型为大型野生动物提供了栖息地，又是中国最重要的两大水系——长江、黄河的发源地，更具对自然资源保护的紧迫性。

三、自然保护区的设计原则

最早设立的原始自然保护区和国家公园是人们无意识设立的，其目的是出于宗教或娱乐，诸如自然物朝拜处、狩猎保留地或动物保护地等。随着自然保护区的相继出现，自然保护工作者意识到，以某一类生物资源或某一濒危物种为对象的资源保护工作已不再能满足保护全球生物多样性的要求。他们将目光转向保护自然资源和物种赖以生存的生态系统和栖息地，呼吁各国政府在特有种、稀有种、濒危种、受危种以及生态系统关键种分布的地区建立各种类型的自然保护区。

1. 保护区的选址原则

物种、基因与生态系统多样性在地球上并不存在一致的分布格局。由于人类活动的影响，自然生境退化与破碎化使得生物多样性的分布格局复杂多变。对于自然保护区的选址问题，Noss 认为应该采用从上到下的递阶方法来作出决策，应考虑到生物的分布与生物多样性数量特征的热点地区。Scott 等认为应采用 GAP 来分析空间尺度上的物种组成、分布与其保护状态，寻求没有出现在生物多样性保护区中的植被类型和物种多样性保护的空白地区，在这些地区建立新的自然保护区。

一般说来，自然保护区的确立原则包括以下几点：

1) 典型性(typicalness)。在不同自然地理区域中选择有代表性生物群落的地区建立保护区，以保护其自然资源和自然环境，探索生物发展演化的自然规律。保护区所代表的自然地理区域的范畴对确定该保护区的类型和级别有着至关重要的意义。

2) 稀有性(rarity)。稀有种、地方特有种或群落及其独特生境，以及汇集了一群稀有种的所谓动植物避难所的地区，在保护区选址中具有特别重要的意义。

3) 脆弱性(fragility)。对环境改变敏感的生态系统具有较高的保护价值，但它们的保护比较困难，需要特殊的管理。

4) 多样性(diversity)。保护区中群落的数量多寡和群落的类型取决于保护区立地条件的多样性以及植被的发生历史因素，这也是保护区选址的重要依据。

5) 自然性(naturalness)。表示自然生态系统未受人类影响的程度。自然性对于建立以科学研究为目的的保护区或保护区的核心区的选择具有特别的意义。

6) 感染力(intrinsic appeal)。虽然从经济的观点来看，不同物种具有不同的利用价值，但是由于科学技术的发展和认识的深化，一些动植物新的经济价值不断被发现。由于不同的物种和生物类型是不可替代的，就这个意义上来说，各个物种及生物群落和自然景观都是等价的。因此从科学观点来看，很难断言哪一种生物群落类型和哪一物种更重要。由于人类的感觉和偏见，不同有机体具有不同的感染力。虽然这一标准只是人类的感觉要求，但对选择风景保护区来说仍很重要。

7) 潜在价值(potential value)。一些地域由于各种原因遭到了破坏，如森林采伐、沼泽排水和草原火烧等。在这种情况下，如能进行适当的人工管理或减少人类干扰，通过自然的演替，原有的生态系统可以得到恢复，有可能发展成为比现在价值更大的保护区。

8) 科研潜力(scientific research potential)。包括一个地区的科研历史、科研基础和进行科研的潜在价值。

上述选择自然保护区的标准有时可能是互相交叉、互为补充的，例如一个具有代表性的保护区同时可能具有多样性、天然性、科研价值；有些标准则可能相互矛盾，相互排斥，如一个稀有的保护对象往往很难具有典型性或代表性等。因此保护区的选择是一个十分复杂的问题，运用上述标准进行选择和评价时，必须和建立自然保护区的目的结合起来，以保护物种多样性最丰富的地区，面积大、功能完整的生物群落或生态系统的典型代表，以及特有物种或特殊兴趣的群体。

2. 保护区的形状与大小

面积大的保护区与面积小的保护区相比，大的保护区能较好地保护物种和生态系统，因为大的保护区能保护更多的物种，一些物种(特别是大型脊椎动物)在小的保护区内容易灭绝。保护区的大小也是生境质量的函数。保护区的大小可能部分地代表关键资源的数量与类型。就维持某一物种有效种群而言，低质量的资源比高质量的资源需要更大的面积。

一个保护区的重要程度随面积的增加而提高。一般而言，自然保护区面积越大，则保护的生态系统越稳定，其中的生物种群越安全。但自然保护区的建设必须与经济发展相协调，自然保护区面积越大，可供生产和资源开发的区域越小，这与人口众多和土地

资源贫乏的国家发展经济是不相适宜的，为了兼顾长远利益和眼前利益，自然保护区只能限于一定的面积，因此保护区面积的适宜性是十分重要的。

保护区的面积应根据保护对象和目的而定，应以物种——面积关系、生态系统的物种多样性与稳定性以及岛屿生物地理学理论为基础来确定保护区的面积。通常物种数量与其生存空间存在着明显关系，在一个区域内，随着面积的增加，物种数目增加，但面积增加到一定程度，物种数目并不一定无限增加。目前保护区大多是孤立地分布在人为活动环境中，呈岛屿状分布。按照岛屿生物学理论，随着岛屿上物种数目的增多，物种迁入率下降，但灭绝率提高。物种数随面积的变化符合下列关系式：

$$S=C\times A^{Z}$$

式中：S 为物种数；A 为岛屿面积；C、Z 为常数，C 值主要取决于测试单位及栖息地和生物类群，Z 值一般在 0.24~0.34 之间。

保护区的大小也与遗传多样性的保持有关，在小保护区中生活的小种群的遗传多样性低，更加容易受到对种群生存力有负作用的随机性因素的影响。与试验饲养种群相似，小的种群容易导致遗传漂变和有奠基者效应的遗传异质性丢失(Lande　1987)。

保护区的大小也关系到生态系统能否维持正常功能。物种的多样性与保护区面积都与维持生态系统的稳定性有关。面积小的生境斑块，维持的物种相对较少，容易受到外来生物的干扰。只有在保护区面积达到一定大小后才能保持正常功能，因此在考虑保护区面积时，尽可能包括有代表性的生态系统类型及其演替序列。

保护区大小的确定还应该考虑干扰与环境变化的作用，特别是全球变暖对保护区的影响。根据国际上不同全球环流模型(GCM)的预测，到本世纪 20~30 年代，全球平均温度将增加 1.5~4.5℃，雨量将增加 7%~15%。许多温带植被将向北移动数百公里或向高海拔地区移动数百米，多数地区的气候、生境条件有大的变化。所以在设计保护区大小时，还应该充分考虑到全球变化的影响。保护区的面积应尽可能地大，允许生态系统对气候变化自然适应，选址时特别优先考虑有完整的海拔梯度的地区。

Wilson 和 Wills(1975)认为，考虑到保护区的边缘效应，则狭长型的保护区不如圆形的好，因为圆形可以养活边缘效应，狭长型的保护区造价高，受人为的影响也大，所以保护区的最佳形状是圆形(图 11-2)。如果采用南北向的狭长型自然保护区，则要保持足够的宽度。

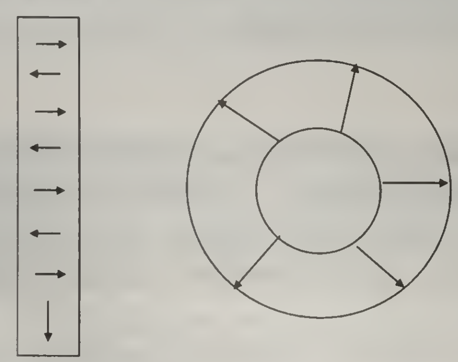


图 11-2　保护区面积和边缘关系示意图(Meffe et al.　1994)

如果保护区很窄，则在矩形保护区中没有真正的核心区，而圆形保护区有核心区(中间小圆圈)。在图中，当保护区局部边缘破坏时，对圆形保护区中实际的影响很小，因为保护区都是边缘；而矩形保护区中，局部边缘生境的丢失将影响到保护区核心内部，减少保护区核心区的面积。

关于建立一个大保护区好还是几个小保护区好的问题曾经是 20 世纪 70 年代争论的焦点之一。大多数研究认为，一个大的保护区比几个小的保护区好。这是因为大的保护区可以包含有更多的物种。由于小保护区的隔离作用，保护区的物种数可能超过保护区的承载能力，从而使有些物种灭绝，这种现象称为“物种松弛”(species relaxation) (Harris 1984，Miller and Harris 1987)。一般说来，那些完全依赖于当地植被、需要大的领地和种群密度较低的物种很容易在保护区内灭绝(Harris 1984)。然而，反对者认为，小保护区虽然容易发生局部灭绝，但能在相对大的范围内保护相当数量的代表生境(Quinn and Hastings 1987)。因为大的保护区划分成较小的保护区以后，有利于提高生物避免灾难性突发事件(如火灾、传染病)的能力。多个小保护区具有生境的多样性，保护的物种会更多。

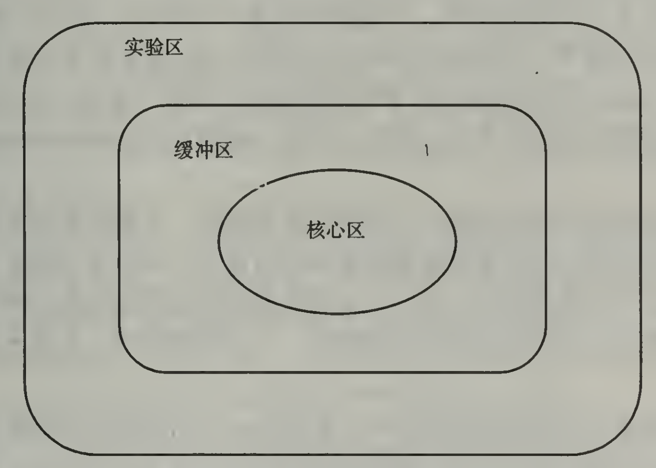


图 11-3 一个理想的自然保护区的功能分区(Noss et al. 1994)

3. 保护区内部的功能分区

保护区的内部功能分区区划是生物多样性保护区的一个全新的观点，在进行保护区内部区划时，一般分为 3 个部分，即核心区、缓冲区和实验区(图 11-3)。将生物多样性保护与生物资源持续利用结合起来，是传统的封闭式保护区要领上的突破。

核心区是原生生态系统和物种保存最好的地段，应严格保护，严禁任何狩猎与砍伐。其主要任务是保护基因和物种多样性，并可进行生态系统基本规律的研究。

缓冲区一般应位于核心区的周围，可以包括一部分原生性的生态系统类型和由演替所占据的受过干扰的地段。缓冲区一方面可防止对核心区的影响与破坏，另一方面可用于某些实验性和生产性的科学研究。但在该区进行科学实验不应破坏其群落生态环境， 可进行植被演替和合理采伐与更新试验，以及野生经济生物的栽培或驯养等。

缓冲区周围还要划出相当面积作为实验区，用作发展本地的特有生物资源的场

地，也可作为野生动植物的就地繁育基地，还可根据当地经济发展需要，建立各种类型的人工生态系统，为本区域的生物多样性恢复进行示范。此外还可在当地推广实验区的成果，为当地人民谋利益。

四、自然保护区网与生境走廊

人类活动所导致的生境破碎化是生物多样性面临的最大威胁。生境的重新连接是解决该问题的主要步骤，通过生境走廊可将保护区之间或与其他隔离生境相连。建设生境走廊的费用很高，同时生境走廊的利益可能也很大，只要有可能，就应当将主要的生境相连。生境走廊作为适应于生物移动的通道，把不同地方的保护区构成保护区网。

1. 区域自然保护区网模式

Noss 等(1986)认为，自然保护区的设计与研究集中在单个保护区是不可取的，因为：① 单个的保护区不能有效地处理保护区内连续的生物变化；② 只重视在单个保护区的内容而忽略了整个景观的背景，不可能进行真正的保护；③ 单个保护区只是强调种群和物种，而不是强调它们相互作用的生态系统；④ 在策略上应趋向于保护高等生物多样性的地区，而不是保持地区的生物多样性的自然性与特征。因此，Noss 等提出了在区域的自然保护区网设计节点—网络—模块—走廊(node-network-modules-corridors)模式。

节点是指具有特别高的保护价值、高的物种多样性、高濒危性或包括关键资源的地区。节点也可能在空间上对环境变化表现出动态的特征。但是节点很少有足够大的面积来维持和保护所有的生物多样性。所以，必须发展保护区网来连接各种节点，通过合适的生境走廊将这些节点之间连接成为大的网络，允许物种基因、能量、物质在走廊中流动。

多用途模块是由 Harris(1984)提出的，是指除一个保护得很好的核心区以外，在核心区与远离中心的人类利用土地之间的缓冲带。在核心区不允许开发，而缓冲带允许一定的人类活动与科学研究，允许进行与核心区生物多样性保护相兼容的活动，如教育、生境恢复、生态旅游等。

一个区域的保护区网包括核心保护区、生境走廊带和缓冲带(多用途区)。值得强调的是，一个真正的保护区网应包括多个保护区，其内缓冲带应严格保护，而外缓冲带允许有各种人类活动。

2. 生境走廊的类型

不同物种的扩散能力差异很大。例如，一个夜行哺乳动物能通过 100m 宽的无植被区，而对森林内部的鸟类和白天活动的蛇来说，这 100m 宽的地带是不可逾越的障碍。不同的物种需要的廊道不一样，有时廊道相当于一个筛子，能够让一些物种通过，而不让另一些物种通过(Noss 1991)，对不同的物种要求有不同的廊道类型。

野生动物的廊道有两种主要类型：第一种是为了动物交配、繁殖、取食、休息而需要周期性地在不同生境类型中迁移的廊道；第二种类型是在异质种群中个体在不同生境

斑块间的廊道，以进行永久的迁入迁出，在基因流动及在当地物种灭绝后重新定植。

Noss 提出了 3 种在不同时空尺度上的野生动物走廊类型，因为不同时空尺度和生物的不同组织水平有不同的生境连接问题。① 小尺度的两个紧密相连的生境斑块的连接，如篱笆墙的设计适应于特定的边缘生境，如一片树林之间可以利用狭窄的乔木、灌丛条带来使小脊椎动物(如啮齿类、鸟等)移动，这样的走廊仅仅适宜于边缘种的特点，而不利于内部种的移动；② 在景观镶嵌尺度的走廊上建立比第一类更长、更宽的连接主要景观因素的廊道，它们作为保护区景观水平上的廊道使内部种和边缘种作昼夜或季节性的或永久的移动，要求有大片带状的森林将其他分离的保护区沿河边森林、自然梯度或地形(如山脊等)连接；③ 连接区域内的自然保护区网。

3. 生境走廊的功能

在设计廊道时，首先必须明确其功能，然后进行细致的生态学分析。影响生境走廊功能的决定性因子很多，有关的研究主要集中在具体生境和特性的廊道功能上，即允许目标个体从一个地方到达另一个地方。但一个真实景观上的生境廊道对很多物种会产生影响，所以在廊道的计划阶段，以一个特定的物种为主要目标时，还应当考虑景观变化和对生态过程的影响。实际上景观廊道在保护区中的作用是：① 给野生动物提供居住的生境；② 作为移动的廊道。进一步可细分为：允许动物昼夜或季节性移动；有利于扩散与种群间的基因流动和避免小种群灭绝；允许物种进行长距离迁移和适应随时发生的外界环境变化(如火灾等)。

对一些特殊的生境类型而言，即使是很小的生境走廊也是应当保护的。河岸森林有丰富的冲积土壤和高的生物生产力，生存着丰富的昆虫及脊椎动物和许多以树洞和基质作为领域的鸟兽，因此像河岸森林这样很小的移动走廊也应当保护。

大保护区间的走廊是核心区的扩展，生境走廊的宽度包含了适宜生境，因此能将边缘效应减少到最小。走廊的最佳宽度与保护目标种的领域大小相关。

保护区或其他合适生境斑块间的动物廊道是生境走廊最重要的功能之一。一个核心保护区可能不包括大型动物一年甚至一天的活动范围，建立生境走廊的目的是为动物提供生存空间，保持物种安全的迁移机会。脊椎动物特别是一些有蹄类动物在领域之间的迁移路线是相对固定的。高速公路的建设则阻止了动物的迁移，因为一般动物只会通过路面而不会利用专门为野生动物修建的地下通道。于是，在高速公路上许多动物因车祸而死亡。如美国加利福尼亚的研究人员给 35 只美洲狮(*Felis concolor*)戴上了无线电项圈，在开始研究的两年中，就有 7 只美洲狮在高速公路上被汽车撞死。

扩散是指动物远离它们原来栖息地的迁移。生境破碎化可产生地理隔离，不利于物种个体扩散，因此只有保持那些动物的扩散生境走廊时，动物才能安全扩散。有关动物扩散的研究表明，在设计保护区时，必须通过适合的生境走廊将保护区的核心区或目标种群的中心联系起来。

由于二氧化碳等温室气体增加所导致的温室效应，许多温带植被会向北移动数百公里或向高海拔移动数百米。而人类活动改变了土地利用类型，相当于在景观尺度上设置了许多屏障，这将对物种的长距离移动产生致命的影响。在生境走廊设计时应该充分考虑其后果。如果全球变暖的速度如所预测的那样快，即使是设有理想的廊道，许多物种

也不能很快地迁移。

4. 生境走廊的设计

保护区间的生境走廊应该以每一个保护区为基础来考虑，然后根据经验方法与生物学知识来确定。应注意下列因素：要保护的目标生物的类型和迁移特性，保护区间的距离，在生境走廊会发生怎样的人为干扰，以及生境走廊的有效性等。

仅由边缘生境组成的生境走廊称为线形生境走廊(line corridor)，与此相对的是带状生境走廊(strip corridor)，带状走廊包含有更宽的内部生境，具有完整的群落功能，而且生境走廊具有很大的面积，具有自己的斑块动态。

为了保证生境走廊的有效性，应以保护区之间间隔越远则生境走廊越宽的要求来设置生境走廊。因为大型的、分布范围宽的动物(如肉食性的哺乳动物)为了进行长距离的移动需要有内部生境的走廊。如在 50m 宽的生境走廊中黑熊不可能移动多远距离。动物领域的平均大小可以帮助我们估计生境走廊的最小宽度(表 11-4)。

研究表明：使用生境走廊时除考虑家域与走廊宽度外，其他因素如更大的景观背景、生境结构、目标种群的社会结构、食物、取食型也影响生境走廊的功能(Lindenmayer and Nix 1993)。因此，设计生境走廊需要详细了解受保护物种的生态学特性。

表 11-4 几种哺乳动物最小生境走廊宽度估计

物种	位置	最小宽度 /km	来源
狼	美国明尼苏达州	12.0	Nowak，Paradiso 1983
狼	美国阿拉斯加	22.0	Ballard，Cpraker 1979
黑熊	美国明尼苏达州	2.0	Rogers 1987
美洲狮	美国加州	5.0	Hopkins 1982
短尾猫	美国南卡罗来纳州	2.5	Giffith，Fendly 1982
白尾鹿	美国明尼苏达州	0.6	Nelson，Mech 1987
矮獴	坦桑尼亚	0.6	Rood 1987

注：本表数据基于平均雌性家域大小计算(Meffe et al. 1994)。

五、自然保护区的管理与评价

自然保护区建立以后，管理工作是最为重要的，管理是完成保护区目标的具体手段和措施。即在获取最佳生态效益的前提下，争取最大的经济利益与最好的社会效益。具体包括保护区的生态目标管理(群落与生态系统结构与功能的保护)、科研管理、行政管理、对外宣传、旅游管理等。评价是对保护区的目标与管理现状进行分析，确立该采取的行动。

1. 自然保护区科学管理的内容

自然保护区的科学管理工作包括行政管理系统、科研管理系统、生态与景观管理系统、经营管理系统及宣传教育系统等。

世界自然资源保护大纲规定的自然保护的 3 个目标为：保持基本的生态过程与赖以生存的生态系统；保存基因的多样性；保护物种使之能被永续利用。在中国的自然保护纲要中规定：自然保护的主要目标是保护人类赖以生存和发展的生态过程和生命支持系统，使其免遭破坏和污染，保证生物资源的永续利用；保存生物物种的遗传多样性与保留自然历史纪念物。

Meffe 等(1994)在世界自然资源保护大纲的 3 个目标的基础上，提出保护区管理的 5 个目标：① 关键的生态系统必须保护，必须丢弃单个物种的管理方式，而应该重点保护生态过程；② 管理的目标必须来自对保护区系统的生态学理解；③ 将外部的负面影响如污染等减到最小，而外部有益的方面必须使之达到最大；④ 进化过程必须得到保护；⑤ 自然保护区的管理应是顺应生态规律的，要将人为的介入降至最小。

中国自然保护区的建设目标有以下 4 条：① 保护自然环境和自然资源，维护自然生态的动态平衡，在科学的管理下保持本来的自然面目，一方面维持有益于人类的良性的生态平衡，另一方面创造最佳人工群落模式和进行区域开发的自然参照系统；② 保存物种的多样性，即保存动物、植物、微生物物种及其群体的天然基因库；③ 维持生态系统包括生物物种和自然资源的永续发展和持续利用，使其不但成为种质资源的提供基地，也成为经济建设的物质基础；④ 保护特殊的有价值的自然人文地理环境，为考证历史、评估现状、预测未来提供研究基地。

区域或一个国家自然保护区如何合理布局，保护区类型合理比例的确定，各级保护区(国家级、省级、县级)发展比例，以及每个自然保护区的资源管理和利用等，都要求通过规划的制定和实施来达到目的。因此，规划管理是自然保护区科学管理的基础。

自然保护区的规划还必须以区划工作为依据。自然保护区区划工作是一项十分重要的工作。要建立既能反映出我国复杂多样的自然地理环境的各种类型的自然保护区，又能使自然保护区在全国范围内的分布比较合理，形成体系完整的中国自然保护网络，并与世界自然保护网络协调地衔接起来，就必须首先搞好我国自然保护区划工作。

自然保护区法是调整自然保护区建立、保护、管理方面各种社会关系的法律规范的总和。它的宗旨是用法律手段保障自然保护区的正确建立和有效保护，以最充分地发挥这种特殊自然保护形式对人类长期的生存与繁荣的积极作用。

科学管理自然保护区必须以科学技术作为基础和后盾，没有科学研究的指导要进行现代化的管理是不可能的。自然保护区的研究包括以下内容：① 保护区内生态系统调查和分析，包括其结构、功能稳定性、多样性、矿物质和能源等等；② 确定生物圈内的保护区单元是否具有代表性并研究和建立有关这种确定的方法。

2. 自然保护区的评价

自然保护区的评价应该包括 3 个方面：生态评价、管理现状评价和社会经济评价。自然保护区及其保护对象的生态评价是鉴别保护区的生态价值和科学意义，从而为选择建立自然保护区和保护区级别的晋升提供科学依据，这是自然保护区建设和管理中的一项基本工作。

国内外在自然保护区和野生动物及其生境的生态评价指标方面的研究很多(张建华等 1993)。在过去评价用的比较多的指标主要有：多样性、稀有性、自然性、面积、

代表性、教育价值、科研价值、人类威胁、潜在价值、感染力、脆弱性、物种丰度、土地有效性等。

在保护区的评价中，教育价值是与所开展的活动有关的，人类的威胁则与保护区管理关系密切，这是中国保护区与管理有关的主要问题。保护区面临的人类侵扰压力，一方面是指自然保护区机构实体本身的压力，主要指土地利用的竞争压力；另一方面指对保护区内保护对象的侵扰，如对林木资源的砍伐，对野生动物的猎捕，对保护区水资源的污染，保护区内开发活动对环境的影响等。

保护对象的生存威胁除人类的威胁以外，也有保护对象自身的因素，这常常表现为生态系统和物种的脆弱性方面，这是自然的属性。脆弱性的标准是复杂的，它反映了生物群落和物种对环境改变的敏感程度。脆弱的种群表现为生存力弱、繁衍能力差、对环境变化的适应性低，极易遭受威胁甚至灭绝。脆弱的生态系统在遭受破坏后难以恢复，需要及时保护和特殊管理。

自然保护区的有效管理应该从管理条件、措施、科研基础与成效等 4 个方面评价，薛达元等(1994)对这些指标进行了量化，提出了综合评判体系。其主要内容如下：

1) 管理条件。包括自然保护区管理机构的设置与人员配备、基础设施的建设水平与经费来源等。管理机构是保护区的指挥中枢，对内组织领导保护区职工和保护区内居民的日常管理、生产和生活，对外协调地方政府和上级主管部门对保护区的支持，并处理保护区与周围群众的关系。健全的管理机构必须分设若干职能部门，并配备一定数量的、训练有素的行政管理人员和技术人员，这是维持保护区正常管理和实现保护区管理目标与发展规划的根本保证。同时也应该包括基础设施，如办公设施、生活设施、保护设施和科研设施等。自然保护区必须有稳定的经费来源和充足的经费数额，以保证正常管理工作的开展和管理计划的实施。

2) 管理措施。实施保护区有效管理需要一套切实可行的管理措施，而管理措施的评价内容包括管理目标的确定与发展规划的编制、管理计划的制定和管理法规的建设这 3 个方面。实际上保护区的管理目标的制定是最重要的，即确立要保护的主要对象与发展规划、实现目标的手段和实现的时间。可通过立法，使保护区的土地面积、工作职能和保护责任以及管理手段等得到明确规定，从而使保护区的建设与管理工作规范化、正常化和法律化。

3) 科研基础。科学研究是保护区实施有效管理的基础，坚实的科研基础是制定保护区管理目标、发展计划和管理计划的依据。评价保护区科研基础主要是进行保护区的资源本底调查如地质、地貌、土壤、气候、水文的调查，动植物区系与分布及保护区及其周围的经济社会资料调查，在此基础上进行专题研究。而稳定的训练有素的科研人才是科学研究的基础。

4) 管理成效。保护区内资源和主要的保护对象的状况是保护区管理成功与否的标志，保护区的经营能力可衡量其经济活力和自养水平，保护区的一切管理活动和发展前景都依赖于其经济实力。日常的管理包括保护区的宣传教育、火灾、污染、病虫害的防治、职工的生活、教育等。保护区与当地居民的和睦相处以及相互支持是维持保护区稳定发展的重要条件，是保护区管理评价的重要方面。

自然保护区是具有多种功能的自然—社会—经济实体，具有多种效益。除经济利益

外，保护区有多种直接或间接的社会和生态效益。通过对保护区各种价值的评估，对它们进行量化，变为可比的市场价格并用货币表示，可对保护区潜在的社会和经济作用做出全面的评价。

第四节　生物圈保护区

一、人与生物圈计划

人与生物圈计划(man and the biosphere programme，简称 MAB 计划)，是联合国教科文组织(UNESCO)针对全球面临的人口、资源、环境问题，于 1971 年发起的一项政府间跨学科的大型综合性研究计划。旨在通过全球范围的合作，达到如下目标：① 用生态学的方法研究人与环境之间的关系；② 通过多学科、综合性的研究，为有关资源和生态系统的保护及其合理利用提供科学依据；③ 通过长期的系统监测，研究人类对生物圈的影响；④ 为提高对生物圈自然资源的有效管理而开展人员培训和信息交流。到目前为止，已经有 128 个国家参加了该计划，并建立了国家委员会，负责该计划在本国的实施。

中国 MAB 国家委员会于 1978 年经国务院批准建立。新一届委员会由各有关政府部门官员、知名科学家及新闻界和学术团体的代表共 41 人组成。中国 MAB 国家委员会的常设机构——中国 MAB 秘书处，设在中国科学院，负责日常工作。近 20 多年来，执行和协调了国际 MAB 计划有关的大量国际、国内合作项目及各类活动在中国的蓬勃开展。

自联合国教科文组织发起的人与生物圈计划在中国实施后，一种新型的自然保护思想——生物圈保护区传入中国；特别是 1979 年中国第一批生物圈保护区被批准纳入世界生物圈保护区网络以来，这一新概念逐渐被从事自然保护事业的科学家、管理人员以及政府决策人员所接受，原有的传统逐渐改变，建立起各种新型的科学管理模式，使自然保护区逐渐走上一条实现生态效益、社会效益、经济效益同步的持续发展道路，这对中国的自然保护事业是一个重要的转折。国务院于 1994 年颁布的《中华人民共和国自然保护区条例》中便吸收了生物圈保护区概念的新观点。

二、生物圈保护区

1. 生物圈保护区的概念和功能

生物圈保护区是纳入 MAB 计划并在国际上得到公认的、具有代表性的陆地和沿海受保护的区域。它区别于其他各类自然保护区的突出特点是强调多功能，即：对生物多样性及其生态过程的保护功能；提供科学研究、监测、培训、环境教育、信息交流的后勤基地功能；注重自然生态系统的保护与资源利用的相互协调，建立资源持续利用模式，对周围同类地区提供示范的发展功能。每个生物圈保护区通过在空间结构上设置的核心区、缓冲带和过渡区三个区域，来实现上述三大基本功能。

核心区——每个生物圈保护区必须包括一个或多个核心区。核心区是根据明确的保护目的，受到严格保护的、自然的或仅受到最低限度人为影响的典型生态系统。它有明确的边界，还要有足够大的面积，以满足所栖息的动植物种群正常进化所要求的活动空间，从而实现有效保护，确保被保护的生态系统可以通过自我调节维持系统的稳定和自然演化过程。核心区内只能开展对环境没有明显改变作用的少数科研、监测活动。

缓冲带——在核心外围或与核心区毗连，具有明确的边界，并且常与核心区相一致。可用于开展与核心区保护相适应的研究、教育、培训及生态旅游等活动。

过渡区——在缓冲带的外围，可开展资源合理利用的研究、试验与示范。建立保护与持续发展相协调的示范基地，旨在向周边地区推广和扩展，促进周围社区环境—经济—社会的协调发展。因此，该区域是一个开放系统，可以没有明确的边界。

生物圈保护区的三大功能通过与 3 个区域的空间结构有机结合而得到体现和发挥，这就是生物圈保护区的主要特点。

2. 生物圈保护区的战略意义

生物圈保护区概念首先把保护区看做是一个开放式的系统，打破了传统的封闭式保护，通过对保护区在空间结构上划分核心区、缓冲带和过渡区的方法，为实现保护、研究、监测、教育、培训以及发展的多种功能提供了适宜的场所。其次是重视人对生物圈的影响，把世代生活在这里的居民视为这一开放系统中的重要成员和最活跃的因素，使在资源利用活动中与自然相协调的传统技能得以保存，并与科学方法输入的新技术相结合，参与资源的管理，这就激发了当地居民的主人翁意识，把长期难于解决的保护与发展之间的矛盾化解为和谐的关系。最后，生物圈保护区的提出有利于协调统一世界各国传统的自然保护思想，使自然保护走向全球化。

三、生物圈保护区及其网络发展状况

生物圈保护区是在 UNESCO/MAB 计划下发起建立的，它是 MAB 计划的最重要实施基地。自 1976 年在世界范围建立第一批生物圈保护区以来，至 1997 年，已在 87 个国家建立了 352 个生物圈保护区，基本上覆盖了全球陆地上各类生物地理区域，形成世界生物圈保护区网络(WBRN)。中国已有 14 个保护区被批准纳入该网络。这些保护区，无论是所保护的物种、自然景观或生态系统还是其在发挥保护、科研、教育、培训和发展等功能方面，都是中国众多自然保护区中的佼佼者。它们保存了众多珍稀、濒危、特有物种和原始自然本底，是生物多样性和文化多样性最丰富、自然生态系统及自然景观和人文景观保存最完好的精华所在。

为了推动生物圈保护区概念的实施，促进中国自然保护区的科学管理和持续发展，使更多的自然保护区走向世界，扩大交流与合作，中国 MAB 国家委员会于 1993 年建立了中国生物圈保护区网络(CBRN)。网络成员除了已纳入世界生物圈保护区网络的 14 个生物圈保护区外，还吸收了大部分国家级自然保护区，作为世界生物圈保护区网络的后备力量。成员数量由建立之初的 45 个扩展到目前的 66 个，包括了全国各部门管理的各种生态系统类型的自然保护区。CBRN 建立后，制定了行动计划，并在国际合

作、科学研究、培训、信息交流、持续发展等领域开展了一系列活动：创办和出版了网刊——《中国生物圈保护区》定期中文季刊和不定期英文专刊、中英文通讯、MAB 计划中英文介绍手册及计算机主页，以及其他多种出版物在国内外开展信息交流；在不少保护区开展了国际、国内合作，如地理信息系统(GIS)用于保护区管理、生态旅游管理和规划、生物技术运用等科学合作研究项目；举办各种类型的人员培训、专题研讨和对生物圈保护区的评估；组织保护区管理人员参与国际交流和互访；建立跨国界保护区和姊妹保护区等等。CBRN 的建立及其开展的活动，促进了中国自然保护事业向纵深发展，同时也推动了东亚地区生物圈保护区网络(EABRN)的建立与发展，受到广泛的国际关注和赞赏。1996 年，世界保护联盟(IUCN)的世界保护区委员会(WCPA)将其为表彰在自然保护事业中做出突出贡献的集体或个人的最高荣誉奖——弗雷得·帕卡德奖(Fred M. Packard Award)，授予中国 MAB 委员会。

人与生物圈计划及生物圈保护区的概念，经过 20 多年的发展和实践已得到世界公认。特别是 1992 年联合国环境与发展大会(UNCED)上 100 多个国家签署的《生物多样性公约》和《21 世纪议程》，又赋予了 MAB 计划及其生物圈保护区新的使命。生物圈保护区已成为实施《生物多样性公约》和《21 世纪议程》的重要基地，体现出生物圈保护区在全球环境与发展领域中的重要地位和作用。中国 MAB 及其 CBRN 将一如既往地为全人类的持续发展做出应有的贡献。

四、中国的 14 个生物圈保护区

中国是世界上开展人与生物圈国家委员会活动最积极的国家之一，而且中国是一个拥有从热带到寒带多种气候类型的大国，因此其生物圈保护区类型也就丰富多彩。世界生物圈保护区网络中已包含中国的 14 个生物圈保护区。它们是中国最深的高山湖泊——“天池”的长白山，北回归线上的绿洲——鼎湖山，举世闻名的“大熊猫之乡”——卧龙，有“世界独生子”之称的黔金丝猴产地和佛教圣地——梵净山，“昆虫世界”——武夷山，欧亚大陆典型草原——锡林郭勒，浓缩了从高山冰雪带至森林、草原、荒漠、绿洲、农田等垂直带系列的博格达峰，有“野人”传说和“白化动物”之谜的神农架，被誉为“鹤乡”的盐城，“生物多样性和文化多样性共存的热带之乡”——西双版纳，“喀斯特森林明珠”——茂兰，被誉为“大树王国”的天目山，完整保存了原始红松林的丰林，美妙奇幻的著名风景区——九寨沟。这些生物圈保护区的基本情况见表 11-5。

表 11-5 中国的生物圈保护区

生物圈保护区	地理位置	面积 /hm^2	海拔 /m	保护对象	建区时间	晋升国家级保护区时间	纳入世界生物圈保护区时间
长白山	吉林省安图、抚松、长白县境内	196 465	720~2691	温带山地森林生态系统及自然历史遗迹、珍稀动植物	1960	1986	1979
鼎湖山	广东省肇庆市	1155	14.1~1000.3	南亚热带季风常绿阔叶林森林生态系统及宗教文化	1956		1979
卧龙	四川省汶川县	200 000	1200~6250	大熊猫等珍稀物种和山地森林生态系统	1963	1975	1979
梵净山	贵州省江口、印江、松桃苗族自治县境内	41 647	500~2570.5	黔金丝猴、珙桐等珍稀动植物和中亚热带原始森林生态系统	1978	1986	1986
武夷山	福建省武夷山市、建阳市、光泽县交界处	56 527	200~2158	中亚热带森林生态系统及珍稀动植物	1979	1979	1987
锡林郭勒	内蒙古锡林郭勒盟锡林浩特市境内	1 078 600	950~1500	草原生态系统及野生濒危动植物	1985	1996	1987
博格达	新疆维吾尔自治区阜康市	217 000	440~5445	中国温带内陆干旱区典型荒漠生态系统及自然景观	1980		1990
神农架	湖北省房县、兴山、巴东县境内	70 000	398~3105.4	亚热带森林生态系统和金丝猴、珙桐等珍稀物种	1983	1986	1990
盐城	江苏省东台、大丰、射阳、滨海、响水县境内	453 000	1.3~3	丹顶鹤及其沿海滩涂湿地生态系统	1984	1992	1992
西双版纳	云南省西双版纳州景洪、勐腊、勐海县境内	241 776	477~2429	原始热带森林生态系统和野生亚洲大象等珍稀物种	1958	1986	1994
茂兰	贵州省荔波县	21 285	414~1071	中亚热带喀斯特森林生态系统及珍稀动植物	1987	1988	1996
天目山	浙江省临安市	4284	250~1506	中亚热带森林生态系统及自然地理和人文景观	1956	1986	1996
丰林	黑龙江省伊春市	18 165 4	283~688	红松等珍稀物种及温带森林生态系统	1958	1988	1997
九寨沟	四川省南坪县	72 000	2000~4528	地质、地貌、自然景观及大熊猫等珍稀物种	1978	1982	1997

第十二章　恢复生态学与生态工程学

随着科学技术的进步和社会生产力的不断提高，人类创造了前所未有的物质财富，加速了人类文明的发展。而有限的地球资源却不能无止境的向人类提供商品和服务，人口的增长和经济的发展使资源过度消耗，环境恶化和生态退化不断加剧。因而，促进退化生态系统恢复功能的研究和实践事关人类的生存，意义十分重大。恢复生态学与生态工程学现已发展成为当今生态学科的前沿领域。本章首先对恢复生态学和生态工程学的发展概况及其原理和方法进行阐述，然后分别介绍森林、草地和土地的有关生态恢复和生态工程。

第一节　恢复生态学与生态工程学的发展概况

一、生态系统的退化与破坏

(一) 退化生态系统的基本概念

长期以来，由于人们违背生态学规律，对生态环境资源进行不适当的、过度的开发，引起了生态系统的退化与破坏，使其难以达到良性循环。正常的生态系统是生物群落与自然环境在平衡位点上作一定范围的波动，从而达到一种动态平衡状态。退化的生态系统(degraded ecosystem)是一类病态的生态系统，它是指在一定的时空背景下，在自然因素、人为因素，或二者的共同干扰下，导致生态要素和生态系统整体发生的不利于生物和人类生存的量变和质变，生态系统的结构和功能发生与其原有的平衡状态或进化方向相反的位移(displacement)，位移的结果打破了原有生态系统的平衡状态，使系统的结构和功能发生变化和障碍，生物多样性下降，稳定性和抗逆能力减弱，系统生产力下降，这类生态系统也被称为受害或受损生态系统(damaged ecosystem)(王伯荪等 1997)。

(二) 生态系统退化的原因

干扰是使生态系统发生退化的主要原因，它不仅在群落的种类多样性的发生和维持中起重要作用，而且在生物的进化过程中也是重要的选择压力。干扰可来自两个方面，即自然干扰和人为干扰(马世骏 1990)。自然干扰作为生命系统(包括个体、种群、群落和生态系统等各个水平)结构、动态和景观格局的基本塑造力，它不但影响了

生命系统本身，也改变了生命系统所处的环境系统。人为干扰往往叠加在自然干扰之上，共同加速生态系统的退化。自然干扰主要包括一些天文因素变异而引起的全球环境变化(如冰期、间冰期的气候冷暖波动)，以及地球自身的地质地貌过程(如火山爆发、地震、滑坡、泥石流等自然灾害)和区域气候变异(如大气环境、洋流及水分模式的改变等)；人为因素主要包括人类社会中所发生的一系列的社会、经济、文化活动或过程(如工农业活动、城市化、商业、旅游、战争等)(赵桂久等 1993，1995)。

(三) 生态系统退化的结果

干扰的类型、强度和频度在很大程度上决定着生态系统退化的方向和程度。自然干扰总是使生态系统返回到生态演替的早期状态。某些周期性的自然干扰在生态系统演替过程中起着正负反馈作用，使生态系统处于一种稳定平衡状态。但一些剧变或突变性的自然干扰(火山爆发、洪水等)往往会导致生态系统的彻底毁坏。人为干扰可直接或间接地加速、减缓和改变生态系统退化的方向与过程。在某些地区人为干扰对生态退化起着主要作用，且常造成生态系统的逆向演替，以及不可逆变化和不可预料的生态后果，如水土流失、土地沙漠化和盐碱化等(章家恩等 1999)。

二、生态系统的恢复与重建

人类对自然资源的不合理开发和利用，引起自然条件的恶化。如何进行综合整治使退化生态系统得以恢复，这是提高区域生产力、改善生态环境、使资源得以永续利用、经济得以持续发展的关键。

(一) 生态系统恢复与重建的概念

目前，有关恢复(restoration)与重建(reconstruction)的科学术语很多，如修复(rehabilitation)、改造或改良(reclamation)、改进(enhancement)、修补(remedy)、挽救(redemption)、更新(renewal)以及再植(revegetation)等，这些术语从不同角度反映了恢复与重建的基本意图。恢复是着眼于建立环境自然稳定机制，使受损—退化的生态系统向着与现实环境相适应的自然稳定生态系统发展。重建是将生态系统的现有状态进行改善，其结果是增加人类所期望的“人造”特点，压低人类不希望的自然特点，使生态系统进一步远离它的初始状态(钟祥浩等 2000)。因此，所谓生态恢复与重建是指根据生态学原理，通过一定的生物、生态以及工程的技术与方法，人为地改变和切断生态系统退化的主导因子或过程，调整、配置和优化系统内部及其与外界的物质、能量和信息的流动过程及其时空秩序，使生态系统的结构、功能和生态学潜力尽快地成功地恢复到一定的或原有的乃至更高的水平(章家恩等 1999)。

（二）生态系统恢复与重建的目标

生态恢复与重建最关键的要素是必须有恢复和重建的目标。由于自然干扰和人类干扰所导致的退化生态系统，在恢复过程中，可以重新获得一些生态学特性。若这些干扰能被人类所合理控制，生态系统将发生明显的变化。这些变化因管理对策的不同，其结果可能有以下四种：① 恢复到它原来的状态；② 重新获得一个既包括原有特性，又包括对人类有益的新特性状态；③ 由于管理技术的使用，形成一种改进的和原来不同的状态；④ 因条件不断损失，继续保持退化状态(马世骏 1990)。

退化生态系统的恢复是一项复杂的系统工程，确定什么样的恢复与重建目标，必须结合其所处的社会、经济和环境退化状态而定。如在发展中国家严重的人口压力下，生存和发展是根本的大问题。一项恢复和重建计划，没有群众的参与是难以实现的，若不考虑经济利益，群众是没有积极性的，恢复和重建就难以成功。近 20 年来，我国植树造林事业迅速发展，但植被恢复与重建的效果并不令人满意。各种人工群落在经营发展中普遍存在着自维持功能弱，结构不合理，生产力不高，生态经济效益差，新的环境退化等问题。因此，符合我国的恰当的恢复和重建目标应是建立一个具合理结构、功能相互协调的良性循环状态的高效和谐的生态系统，既改善环境，扭转系统退化，提高系统整体功能，又能使社会经济持续发展(包维楷等 1999)。

（三）生态系统恢复与重建的途径和措施

生态系统退化的实质是系统结构和功能的退化，其表现形式是生物多样性的破坏和丢失，导致了环境退化。生物多样性的丧失是生态系统退化的关键和核心，恢复和重建途径应从保护和恢复生物多样性入手，引入植物和动物尤其是一些关键种，重建植被系统及其食物链。恢复和重建的主要措施应是生物措施，包括农业群落、混农林业群落、森林、草地、灌丛等人工植物群落的建设。生物措施又分为三类，一类靠自然恢复，一类是人工生物恢复，第三类是二者的结合。此外，工程措施、耕作措施和管理措施等也是必要的。对严重退化的系统必须辅以工程措施，改善环境。生物措施与工程措施相结合是目前国内采用的主要措施(包维楷等 1999)。

三、恢复生态学和生态工程学的提出

恢复生态学(restoration ecology)是两位英国学者 Aber 和 Jordan 于 1985 年提出的。但他们没有给出确切的定义。20 世纪 80 年代以来恢复生态学得到非常迅速的发展，并定义为研究生态系统退化的原因、退化生态系统恢复与重建的技术与方法、生态学过程与机理的科学。研究对象是那些在自然灾变和人类活动压力条件下受到破坏的自然生态系统的恢复和重建问题，因而具有十分强烈的应用背景和发展前景(王伯荪等 1997)。

恢复生态学这一名称，基本上是以其功能来命名的。由于退化生态系统的恢复和重建过程有很大的人为促进因素，并且这个过程是相当综合的和在生态系统层次上进行

的，因而恢复生态学在一定意义上可以说是一门生态工程学(ecological engineering)(王伯荪 1997)。生态工程学是本世纪中期提出来的一个全新的、多学科相互渗透的应用学科领域。它是属于一个正在逐步形成过程中的新学科。20 世纪 60 年代美国著名生态学家 Odum(1962，1963，1971)首先使用了生态工程一词，并定义为“人运用少量辅助能而对那种以自然能为主的系统进行的环境控制”、“对自然的管理就是生态工程，更好的措辞是与自然结成伙伴关系”，80 年代初期欧洲生态学家应用生态工程的同义词“生态工艺技术”，并定义为“在充分了解生态规律基础上的生态系统管理技术与方法，以尽量降低技术成本及其环境损伤为原则”，其代表人物有 Uhlmann，Straskraba 及 Gnanck。1988 年及 1989 年美国的 Mitsch 与丹麦的 Jorgenson 联合将生态工程定义为“为了人类社会及其自然环境二者的利益而对人类社会及其自然环境进行的设计”。1993 年又修改为“为了人类社会及其自然环境的利益，而对人类社会及其自然环境加以综合的而且能持续的生态系统设计。它包括开发、设计、建立和维持新的生态系统，以期达到诸如污水处理(水质改善)、地面矿渣及废弃物的回收、海岸带保护等。同时还包括生态恢复、生态更新、生物控制等目的”。因此，生态工程一直没有确切的概念，直至 1984 年我国生态学家马世骏教授才提出了令人信服的定义，即生态工程是应用生态系统中物种共生与物质循环再生原理、结构与功能协调原则，结合系统工程的最优化方法，设计的分层多级利用物质的生产工艺系统。生态工程的目标就是在促进自然界良性循环的前提下，充分发挥资源的生产潜力，防止环境污染，达到经济效益与生态效益的同步发展。尽管没有称之为“生态工程学”，但就内涵可以界定“生态工程学”是运用生态学原理调控自然生态系统和人类与生态系统间的关系，以现代化科技手段恢复和组建植被和生态系统最优化工艺体系的学科。然而，无论国内还是国外，生态工程的研究与应用正深入到更广阔领域，涉及的类型与模式也更加多样化，涉及的层次也是由微观到宏观不等，随着更多学科之间的相互渗透和进一步综合发展，生态工程的概念亦必将愈加完善(云正明等 1998，钦佩等 1998)。

第二节　恢复生态与生态工程的原理及方法

恢复生态要求在遵循自然规律的基础上，通过人类的作用，根据技术上适当、经济上可行、社会能够接受的原则，使受害或退化生态系统重新获得并有益于人类生存与生活的生态系统重构或再生过程。恢复生态的原理一般包括自然法则、社会经济技术原理、美学原理 3 个方面(图 12-1)。生态工程可以是人工设计的一个群落、一个生态系统，或是一个更为宏观的地域性的生态空间。生态学和工程学，整体论科学与还原技术的综合利用，环境的综合整治及人类社会的综合发展是生态工程的核心。生态工程原理是实施生态工程的重要理论基础。我国学者(马世骏 1986，颜京松 1986，Ma and Yan 1989，Yan et al. 1992)在系统生态学理论的基础上，吸收了中国传统哲学中有益的部分，根据我国朴素的生态工程实践经验，把生态工程原理总结为整体、协调、自生、再生循环等基本原理，进一步扩展为生态工程的核心原理、生物学原理、系统工程学原理和生态经济学原理(图 12-2)。

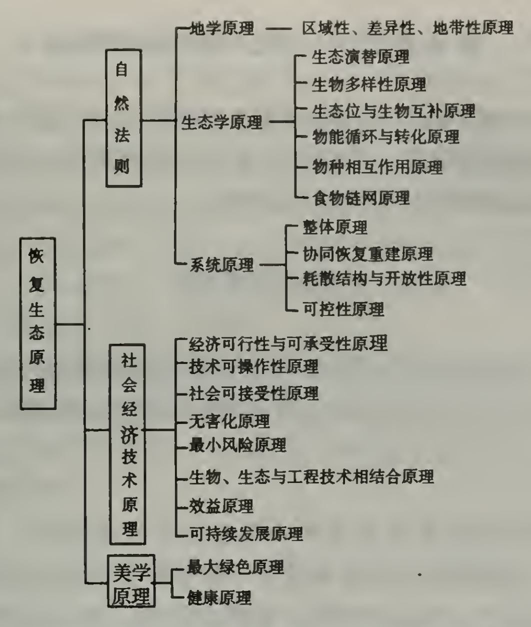


图 12-1　恢复生态遵循的基本原理(引自章家恩等　1999)

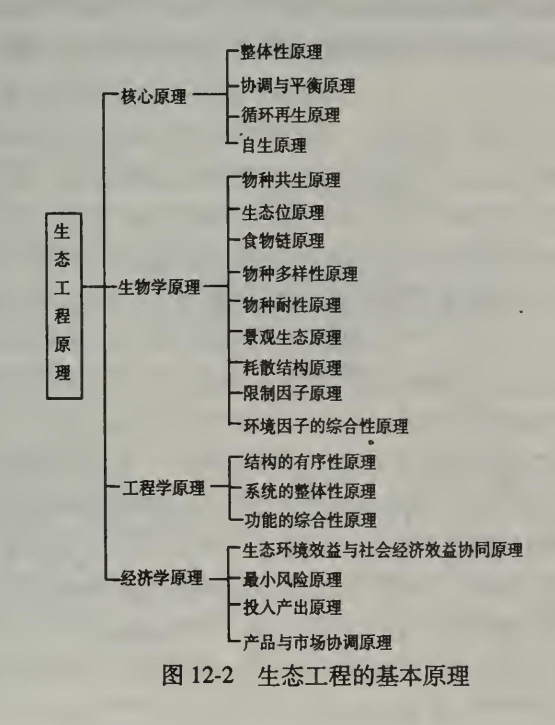


图 12-2　生态工程的基本原理

由于生态系统的极端复杂性，前后阶段的密切联系性，处理问题时的必要的反复过程，以及从管理角度需要对各阶段有恰当的核对与控制，因此有必要制定恢复生态和生态工程的设计和评价方法，只有遵循其基本原理，运用正确的方法，才能有效的进行生态系统的恢复和重建。

一、恢复生态与生态工程的基本原理

生态恢复(ecological restoration)应用性很强，归属于生态工程，它强调的是将生态工程学原理应用于系统功能的恢复，最终达到系统的自我维持(self-maintenance)。这里我们结合恢复生态与生态工程的共同原理加以探讨。

(一) 整体性原理

生态恢复和生态工程主要是按生态系统内部相关性和外部相关性，来研究作为一个有机整体的生态系统或社会—经济—自然复合生态系统的区域环境。

1. 内部相关性

任何一个生态系统都是由生物系统和环境系统共同组成的。生物系统包括生产者、消费者和分解者，环境系统包括太阳辐射以及各种有机及无机(如水、二氧化碳、氧气、各种矿质元素等)成分。各成分依附于系统而存在，系统各成分之间或子系统之间，通过能流、物质流、信息流而有机地联系起来，相互制约和相互作用，形成一个统一的、有机的整体，并具有特定的功能。只要我们从统一的目的和功能出发，深入地揭示构成该事物的各要素之间的相互联系和相互作用，把它看做一个整体，它就是一个系统。

2. 外部相关性

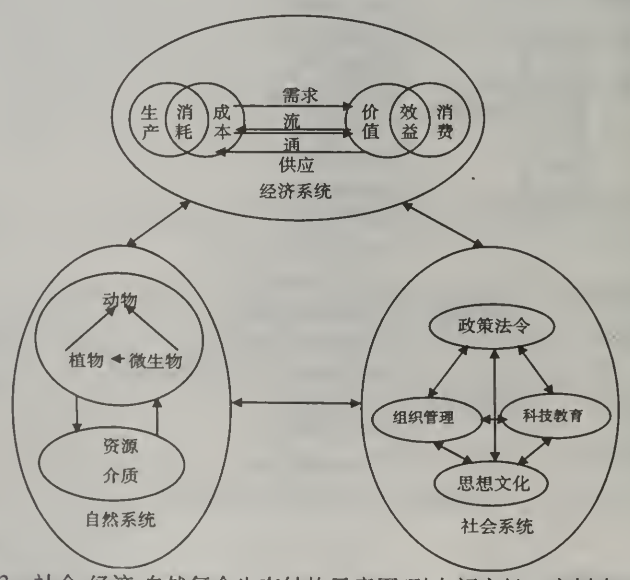


图 12-3 社会-经济-自然复合生态结构示意图(引自颜京松，安树青 1998)

生态系统属于开放型或半开放型系统，其与系统外的周围环境进行物质、能量、信息的交换。以人的活动为主体的系统，如农村、城市及区域，实质上是一个由人的活动的社会属性、经济属性以及自然过程的相互关系构成的社会—经济—自然复合生态系统

(SENCE)(图 12-3)。组成此复合系统的三个系统，均有各自的特性。社会系统受人口、政策及社会结构的制约；价值高低通常是衡量经济系统结构和功能适宜与否的指标；自然界为人类生产提供的资源，随着科学技术的进步，在质与量方面，将不断有所扩大，但是是有限度的。矿产资源属于非再生资源，不可能永续利用，生物资源是再生资源，但亦受到时空因素及开放方式的限制。在复合生态系统中，社会、经济、自然三部分不是简单的加和，而是融合与综合，是自然科学与社会科学的交叉，是时间(历史)和空间(地理)的交叉，并以物质、能量的高效利用，社会、自然的协调发展，系统动态的自我调节为其调控目标(由文辉 1998)。

恢复生态与生态工程是以整体观为指导，在系统水平上研究，整体调控为处理手段。在研究、设计及建立一个生态工程过程中，必须在整体观指导下统筹兼顾，统一协调和维护当前与长远、局部与整体、开发利用与环境和自然资源之间的和谐关系，以保障生态系统的相对稳定性。

(二) 物能循环原理与再生功能

生态系统是由有生命的物质和无生命的环境所构成的统一整体。在生态系统中，由于生物与生物、生物与环境之间不断进行物质循环和能量转化的过程，不但使得生物得以生存、繁衍与发展，而且也使得生态系统保持平衡与稳定。因此，可以说生态系统中的物质循环与能量流动是生态系统的基本功能。

生态系统的物质循环是系统内物质的利用，再利用，循环往复过程。其实质是：绿色植物通过光合作用，用光能将无机物质合成有机质，尔后经消费者逐级利用，最后由分解者还原为无机物，再次为绿色植物所利用的过程。实际上几乎所有的有机体，它们代谢活动的产物终将进入系统之间的生物地球化学循环(biogeochemical cycle)。其中，水和空气起着介质作用，固体物只有溶解于水中才能被生产者吸收利用，一些气态物和水分则需借助空气而由气孔等处进入生物体。

生态系统中的能量流动是指能量通过食物网在系统内的传递和耗散过程，即能量在生态系统中的行为。它始于生产者的初级生产止于还原者功能的完成，整个过程包括着能量形态的转变，能量的转移、利用和耗散。生态系统中全部生命活动所需要的能量均来自太阳。来自太阳的能量在生态系统中的流动是按热力学定律进行的。

生态系统中营养物质的再生主要有：通过动物排泄、微生物分解返回环境；通过真菌，直接从植物残体中吸取营养物质而重新返回植物体；风化和侵蚀过程伴同水循环携带沉积元素，由非生物床进入生物床；动、植物尸体或粪便经微生物的分解作用释放营养物质；人类利用化石燃料生产化肥；用海水制造淡水以及对金属的利用等。

目前，科学信息的普及已促进了人们在某些领域(如农业生态系统)中广泛采用高效率的生态工程措施。某些地区已实行有计划的物质迁移、能量转化工作，并研究其自净效力及环境容量，通过充分发挥各种物质的生产潜力来增产节约，以促进物能的良性循环与再生利用。

（三）生态位原理

种群在一个生态系统中，都有自己的生态位，其反映了种群对资源的占有程度以及种群的生态适应特征。在自然群落中，一般由多个种群组成，它们的生态位是不同的，但也有重叠，这有利于相互补偿，充分利用各种资源，以达到最大的群落生产力(张金屯 2000)。例如在引种工作中，引入的物种与原有的物种如果在生态位上相似，必然发生激烈竞争，通常所引入物种的数量更可能处于劣势，往往被排挤掉。因此，为了移植成功，要求一次引入大量个体，或引入适合当地“空生态位”的种类(李博 1993)。在特定生态区域内，自然资源是相对恒定的，如何通过生物种群匹配，利用其生物对环境的影响，使有限资源合理利用，增加转化固定效率，减少资源浪费，是提高人工生态系统效益的关键。在退化生态系统重建中，考虑各种群的生态位，选取最佳的植物组合，是非常重要的。如“乔、灌、草”结合，就是按照不同植物种群地上地下部分的分层布局，充分利用多层次空间生态位，使有限的光、气、热、水、肥等资源得到合理利用，同时又可产生为动物、低等生物生存和生活的适宜生态位，最大限度地减少资源浪费，增加生物产量，从而形成一个完整稳定的复合生态系统。

（四）物种相互作用原理

自然界没有一种生物能离开其他生物而单独生存和繁衍。物种混居，必然会出现以食物、空间等资源为核心的种间关系，长期进化的结果，又使各种各样的种间关系得以发展和固定。从其性质上，生物之间的关系可归纳为两类(金岚等 1992)，一种是互利的，即一种生物对另一种生物有利；一种是对抗性的，即一种生物对另一种生物有害，在这两个极端类型中还存在着过渡类型(详见第二章)。

一个完整的生态系统，生物之间本身也存在着这种相互关系。如何选择匹配好这种关系，发挥生物种群间的互利机制，使生物复合群体“共存共荣”，是生态工程中人工生态系统建造的一个关键。

（五）食物链原理

生态系统中被植物贮存的能量和物质，常以一系列吃与被吃的步骤通过生态系统，各种生物按其食物关系而排列的顺序称为食物链(李博等 1993)。在生态系统中，食物链之间又相互连接形成了一个十分复杂的“食物链网”(详见第二章)。

食物链原理是生态工程要遵循的重要原理，它可以使一种产品通过食物链环节转化为另一种类型的生物产品；使低能量的生物产品通过食物链的浓集作用变成高能量的产品；通过食物链的作用可使一些低价值的产品变成高价值的产品；也可以通过食物链某些环节的增大与减少，使得其中的另一个环节增加或减少。在人工生态系统中，通过食物链的人工代换，可以改变物质、能量的转移途径和富集方式。加强食物链原理在利用上的应用研究与实践是十分重要的。

（六）物种多样性原理

物种多样性是当前一个得到世界关注的问题，是可持续发展的一个重要前提。复杂生态系统是最稳定的，主要特征就是生物组成种类繁多而均衡，食物网纵横交织。其中一个种群偶然增加与减少，其他种群就可以及时抑制、补偿，从而保证系统具有很强的自组织能力。相反，处于演替初级阶段或人工生态系统的生物种类单一，其稳定性就很差。为了保证人工生态系统的稳定和提高系统的效益，必须投入大量的能量和物质来维持，而自然生态系统由于其生物的多样性原因，往往具有较强的稳定性和较高的生产力。因此，在生态工程设计过程中，必须充分考虑人工生物群落的生物多样性问题(云正明等 1998，钦佩等 1998)。

（七）耗散结构原理

耗散结构理论指出，一个开放系统，它的有序性来自非平衡态，也就是说，在一定的条件下，当系统处于某种非平衡态时，它能够产生维持有序性的自组织，不断和系统外进行物质与能量的交换。该系统尽管不断产生熵，但能向环境输出熵，使系统保留熵值呈减少的趋势，即维持其有序性。生态系统各组分不断和外部系统进行物质和能量的交换，在产生相当熵的同时又不断向外界环境输出熵，是耗散结构系统，外力干扰会使系统内部产生相当的变化，一定限度的外力干扰，系统可以进行自我调整。而当外力干扰超过一定限度时，系统就能从一个状态向新的有序状态变化。生态工程的目的是建造一个有序的生态系统结构，通过系统的自组织和抗干扰能力实现其有序性(钦佩等 1998)。

（八）最小风险与最大效益原理

由于生态系统的复杂性以及某些环境要素的突变性，加之人们对生态过程及其内在运行机制认识的局限性，人们往往不可能对生态恢复与重建的后果以及生态最终演替方向进行准确地估计和把握，因此，在某种意义上，退化生态系统的恢复与重建具有一定的风险性。这就要求我们要认真地透彻地研究被恢复对象，经过综合地分析评价、论证，将其风险降到最低限度(章家恩等 1999)。同时，生态恢复往往又是一个高成本投入工程，在考虑当前经济的承受能力的同时，必须要考虑生态恢复的经济效益和收益周期，保持最小风险并获得最大效益，这是实现生态效益、经济效益和社会效益完美统一的必然要求。因此，在生态工程设计与实施过程中，必须在优先考虑经济效益或者社会效益的前提下，同时来充分考虑生态环境效益的提高。

二、恢复生态与生态工程的基本方法

按照恢复生态与生态工程基本原理，分步骤进行生态工程的设计工作是生态工程实施的主要蓝图和依据。不同工作者在其设计方法上有各自独特的、细节的变化，但通常

分为三个阶段，即规划阶段、实施阶段和运行阶段。其中规划阶段分七个步骤：明确问题、确定目标、背景调查、系统模型分析、系统的优化、系统的评价和决策与规划(由文辉　1998)。

(一) 明 确 问 题

收集有关方面的资料，进行调查与监测，了解对象系统的性质、特点，弄清问题的关键和症结所在，并找出其原因和规律。认识对象系统可为系统模型化、最优化等取得必要的信息；为了搞清楚存在的主要问题，要善于把问题简化到易于分析的程度，同时又必须保留可能受方案影响的所有重要因素。因素的取舍，关系到问题解决的成败，所以必须在认识对象系统的基础上，才能明确地提出问题。该步骤要求做到确切完整，为下面的工作步骤奠定良好的基础。

(二) 确 定 目 标

分析、确定系统的目标及要求，是建立系统的根据和出发点，是系统分析的第一要素。确定目标，就是确定为达到目的所应完成的各项具体指标。生态工程的对象是自然—社会—经济复合生态系统，是由相互促进而又相互制约的三个系统组成。任何生态工程设计必须强调复合生态系统的整体协调性，即自然生态系统是否合理，经济系统是否有利，社会系统是否有效。同时，根据当地的条件，强化某个系统的目标。

(三) 背 景 调 查

实施生态工程，必须正确了解和掌握该地区的自然、社会经济和环境条件。如在我国海岸带，有充足的土地资源和比较丰富的水资源，而生物资源和矿产资源严重不足， 该地区的生态工程在确定目标时就必须考虑增加其生物资源的量，或引进新的经济品种，或开发该地区存在的、但资源量不足的、有经济潜力的种。考虑到社会经济条件，可以根据当地市场、经济实力和劳动力水平，甚至管理层的知识水平，进行生态工程组装。生态工程的基础是生态系统，生态系统的中心是生物种群，而生物种群的存活、繁衍和生长均受到生态环境条件的制约，存在污染的地区，便不能发展有机食品， 除非污染被彻底治理。

调查资料和数据要具有：外界的输入状况、系统的组成及其状态、组分之间的物质、能量和信息的流动、系统的输出与外界的货币、物质因子的交换等。然后从庞杂的数据中，进行抽象和简化，去伪存真，筛选出少量信息量大而又易于操作的关键因子。

(四) 系统模型分析

模型是实际生态系统结构与功能的抽象描述，为了解复杂的生态系统，概念模

型、 文字模型、物理模型和数学模型的应用是必要的。目前比较广泛采用的是数学模型。根据确定的目标和收集的数据，构建合适的数学模型。通过模型的运算，评价所选的模型类型和数据是否合适，在模型和数据合适的基础上，通过运算，找出关键组分和关键因子，找出系统各组分间的物质和能量的流通规律以及流通率变化对系统的潜在压力和影响， 找出组分的灵敏性和系统平衡及稳定能力，找出反馈作用的强度和效应等等。结合定性研究，评价和分析系统的整体行为特征和发展趋势，并进行综合评价。

按不同的方式划分，数学模型可以有不同的类型。表 12-1 是不同体系下数学模型的类型。

表 12-1　数学模型的类型

模型类型	特征
研究模型(research model)	供研究用
管理模型(management model)	供管理用
确定性模型(deterministicmodel)	预测值确定，可准确计算
随机模型(stochastic model)	预测值取决于概率分布
分室模型(compartment model)	定义系统的变量由与时间相关的微分方程数量化
矩阵模型(matrix model)	数学公式中使用矩阵
还原模型(reductionistic model)	尽可能研究不同层次的细节
整体模型(holistic model)	使用一般原理
静态模型(static model)	变量与时间无关
动态模型(dynamic model)	变量是时间(或空间)的函数
分布模型(distributed model)	参数是时间和空间的函数
集中模型(lumped model)	参数有一定的时间和空间范围，认为是常数
线性模型(linear model)	一阶方程是连续的
非线性模型(non-linear model)	一个或多个方程是非一阶的
因果模型(causal model)	输入、状态和输出呈因果关系
黑箱模型(black-box model)	输入仅影响输出，无因果关系
自动模型(autonomous model)	外推不明显取决于独立变量(时间)
非自动模型(non-autonomousmodel)	外推明显取决于独立变量(时间)

引自 Jørgensen　1994

研究模型也称科学模型(scientific model)。随机模型力图包括强制函数和参数中的随机变化，确定性模型则忽视这种变化，即随机输入干扰和随机测定误差为零时，随机演变为确定性模型。对复杂系统的随机描述在数学上是比较困难的，故目前主要使用确定性模型。建立确定性模型的假设是我们对系统的行为完全了解，也意味着系统的未来完全由目前的状态和将来可测定的输入所决定。还原模型和整体模型依赖于科学观念的不同，还原模型尽可能使用多的系统细节，并认为系统的整体行为是细节的总和；整体模型则使用一般原理，并认为亚系统是作为一个功能单位运行的，整体行为不是细节或亚系统行为的总和，它有自己特殊的性质，作为一个动态变化系统，它有初始态、过渡态、波动态和稳定态，稳定态用静态模型模拟，而过渡态和波动态则必须使用动态模型。分室模型、动态模型、线性模型、因果模型和黑箱模型是目前应用较为广泛的模型类型。

（五）系统的优化

系统优化，就是在给定约束条件下寻找系统目标函数最优的方案。对于已经建立数学模型的系统，就是通过对数学模型的求解，来达到系统最优化的过程。目前按建模技术的基础理论来源，可将优化理论的数学模型粗略分为两大类：一是运筹学模型，主要包括线性规划、非线性规划、动态规划和目标规划等；二是控制论模型。

线性规划是优化理论的一个重要分支，具有较完整的理论基础，是目前研究多变量复杂系统应用很广且简便易行的一种数学模型，也是确定模型决策最常用的方法。在生态工程优化设计中，它可以解决树种结构优化问题，林种优化配置，林、农、牧比例结构优化配置问题，以及如何最大限度地发挥有限资源(包括人力资源)，使得各子工程(环境整治工程、种群组合工程、食物链工程等)能够最好地组装、配置、实施，从而找出合理利用现有自然资源、人力资源、物力资源、财力资源的有效途径。

系统动力学是以反馈控制理论为基础，以计算机模拟技术为手段，研究系统动态行为的科学。其解决问题的独特一环就是建立数学的规范模型，从系统内部的微观结构人手进行建模，借助计算机模拟技术以分析研究系统结构功能与动态行为内在关系以及解决问题的对策。它不过分依赖于数据，这对于处理许多非线性的、时变的复杂系统十分有利。当数学规划、统计数学模型在处理数据缺少或数据随时间变化的问题显得束手无策时，系统动力学方法却可以应用自如。对生态工程而言，如将系统动力学方法引入林业系统，建立林业工程的系统动力学模型，可以掌握林业工程的质量，确定实施后生态效益、社会效益和经济效益的长期动态变化规律，从而保障林业资源的永续利用，生态环境的良性循环。

（六）系统的评价

生态系统模型提供了复合生态系统的静态特征和动态变化性质，是生态工程可行性分析或决策分析的基础。评价工作不仅在整体系统全部完成后进行，在每个阶段也是需要的。通过评价逐步调整设计方案，从而使经济效益、生态效益和社会效益达到最高，复合生态系统稳定性和存活进化的机会最大，系统恶化的风险最小等。

目前，系统评价方法主要有价值分析法、经验评估法、单项指标评价法、综合评分法、线性规划法、模型评价法等等。

价值分析法是对系统目的达到程度的一个衡量。它可就某一方面如系统性能、系统费用或系统的可靠性等来研究系统的价值，也可从全局来评价，通过加权的办法计算其价值；经验评估法是专家(一人或多人)凭经验通过对某生态系统考察后进行优劣评估。此方法简便快速，但必须是有丰富经验的人才行，同时在很大程度上会受评价人的主观意识的左右；单项指标评价法是从反映系统的功能效益的众多指标中，选定一个或几个较能反映系统水平高低和体现评价目的的指标进行计量与评价，并在不同系统间进行对比分析，但该方法不能较好地反映生态系统的复杂性和综合性，所以一般不采用；综合评分法是对某一技术措施(或技术体系)的多项经济效益进行综合评价的比较数

量化的一种方法。它将多个具体的指标数值综合起来，用一个数字来表示整个技术措施方案的状况，以评定其优劣；线性规划法是一种确定资源合理利用的数学分析法。在一些约束条件下，求一组变量值，使目标函数值极大或极小，可作为生态工程设计的数量评价方法；模型评价法通过建立一定的数量生态经济模式，借助于电子计算机对系统进行动态模拟，通过改变系统的输入和参数，对系统现状进行评价，并可预测未来状态。

（七）决策与规划

从系统工程的观点来看，所谓决策是指从系统整体出发，为了实现特定的目标，在占有一定的信息和经验的基础上，借助一定的理论、方法和工具，对几个可供选择的方案，进行科学的分析和正确的计算与判断，确定指导未来行动的方案、方针或策略。在生态工程工作中，要经常进行决策，一个决策过程大体上分成三个步骤：① 提出决策目标；② 拟定各种可能的行动方案；③ 从各种方案中选出最合适的方案(朱永达等 1993)。

决策可分三种类型：

1) 确定型决策。是在充分掌握与决策有关的信息的情况下做出的。决策者确切地知道行动方案的得失和未来事件的结果。确定型决策具有较高的可信度。

2) 风险型决策。也称为随机状态决策，它是在决策者没有完全掌握与决策有关信息的情况下做出的。决策者必须在考虑几种可能发生的自然状态及其概率的情况下做出决定，因而带有一定的风险。风险型决策问题可以用决策矩阵法求解，也可用决策树求解。

3) 不确定型决策。这是决策者在很少掌握与决策有关的信息的情况下作出的决策。决策者承认潜在的、不同的自然状态及在各种自然状态下每一方案的支付值。但是不知道自然状态出现的概率。一般来讲，决策者不希望在不确定状态下作出决策，因为它的可信度最差。但是当面临一种新的情况或考虑研制一种新的产品，或进行探索性开发时，不可避免地要在不确定状态下做出决策。

第三节　退化生态系统类型与恢复生态工程

一、退化生态系统类型

根据退化过程及景观生态学特征，退化生态系统可分为裸地、森林采伐迹地、弃耕地、沙漠化地、采矿废弃地和垃圾堆放场几种类型(王伯荪等　1997)。裸地通常具有较为极端的环境条件，或是较为潮湿，或是较为干旱，可能盐渍化程度较深，或是缺乏有机质甚至无有机质，或是基质移动性强等；森林采伐迹地是人为干扰形成的退化类型，其退化状态随采伐强度和频度而异；弃耕地是人为干扰形成的退化类型，其退化状态随弃耕的时间而异；沙漠可由自然干扰或人为干扰而形成；采矿废弃地是由采矿活动所破坏的、非经治理而无法使用的土地；垃圾堆放场是人为干扰形成的家庭、城

市、工业等堆积废物的地方。

综观各类退化生态系统的破坏程度，结合生态恢复与生态工程原理与方法，我们将介绍以下几方面的生态恢复与生态工程。

二、林业生态恢复与生态工程

(一) 森林资源及其利用状况

森林既是一种自然资源，也是生态环境的组成成分之一。其庞大的生态系统是最丰富的生物多样性宝库，为人类提供了多种产品和效益。但是由于人类对森林作用的认识不足，从世界范围来看，当前毁林最严重的是在热带。据联合国粮农组织公布的数字，1980 年热带国家森林以 0.6%的速度消失，到 1990 年消失速度则达 1.2%。据世界野生生物基金会统计，赤道周围每年毁掉的森林面积为 247 975km^2。如果照此速度继续下去，30 年后地球上除自然保护区外，将不会有热带森林保存下来。

我国现有森林面积 1.25 亿 hm^2，森林蓄积量约 90 多亿 m^3，居世界第 5 位，但人均森林面积则居世界第 121 位。森林覆盖率为 12.98%，属少林国家。历史上的长期破坏和解放后过度采伐是造成森林资源减少的主要原因，经营政策的失误和居高不下的人口压力加速了林地植被的开垦。在森林资源减少的同时，森林的品质也日益恶化，如原始林变成了次生林和人工林，老龄林变成了中、幼龄林。上述两个方面的综合，不仅使木材和林副产品资源短缺，并且使珍稀动植物减少、濒危，甚至灭绝，使自然灾害加重，使森林其他各种生态功能降低。

(二) 森林生态恢复和林业生态工程的概念

森林生态恢复就是指对已破坏或已恶化的森林生态环境进行修复，使其恢复到被破坏或恶化以前的良性循环的状态。即恢复森林生态系统合理的结构、高效的功能和协调的关系。林业生态工程处于新的研究领域，目前还没有一个确切的定义。云正明认为：林业生态工程是根据生态学、生态经济学、系统科学与生态工程原理，针对自然资源环境特征和社会经济发展现状所进行的以木本植物为主体，并将相应的植物、动物、微生物等生物种群人工匹配结合而形成的稳定而高效的人工复合生态系统的过程。它包括传统的造林绿化内容，一些单项造林技术与新技术的筛选与应用，是配套技术合理组合的完整工艺流程。

森林本身是一个具有独特森林生物和森林环境的生态系统。森林生物之间以食物链形式不断进行着物质、能量的交换，且具有紧密的共生、抗生关系。林业生态工程的人工群落或生态系统建造是林业发展的一个重大进步。根据生物与环境相互作用原理，利用环境建设工程来保证生物群落的建造，同时，利用生物对环境的影响使系统生产力不断提高。因此，建造一个优化的群落结构，不同于简单的造林绿化，它是一个综合的系统工程。

(三) 林业生态工程的主要内容

森林生态系统的恢复与重建归属于林业生态工程(包维楷等　1999)。其内容十分复杂，它可分为环境调控工程、生物种群选择与匹配工程、群落建造工程、食物链与加工链工程四个部分(云正明等　1999)。

1. 环境调控工程

环境的调控、建造是人工生态系统的一个重要特征。它体现了人类对环境的干预过程。环境的调控、建造主要包括：水分与土壤环境的调控、光热资源环境的调控、营养成分和数量的调控和小气候的人工调控。人工环境调控、建造的目的是以人类目前可能做到的人工措施，改变一些对生物不利的环境因子，从而使人工生物群获得顺利生长发育的措施或工艺技术。比如，为了保证植物生长发育必须对当地现实环境进行人工调控：造林中常讲的整地，沙漠造林采用的人工沙障，干旱地区的水分富集，覆盖保水、吸水剂的应用，高湿地带的排水，土面增温，防兽网罩的应用，土壤改良等，都属于环境调控工程。在环境调控建造过程中，目前的主要目标是减弱对生物生长发育具有限制作用的环境因子，增加生物生长发育所需求的环境因子。

2. 生物种群选择与匹配工程

生态工程的生物种群选择，要根据当地的自然环境特征和社会经济环境，选择最佳的适生种。种群匹配是在主要种群选定以后，根据主要种群特性选定次要种群的过程。林业生态工程中，什么种群最适宜、效益最高就选什么种群作为主要种群。次要种群的匹配要根据与主要种群互利共生原则来选定，这些种群可以包括乔木、灌木、草本植物甚至于农作物或低等生物(食用菌)。只有这样才能真正做到“顺天应人”。例如，在我国的太行山区绿化过程中，过去基本是以刺槐、油松等用材树种作为主要种群来选择的。结果由于生态环境恶劣，这些树木长期不成材，造成了山区农民对绿化失去信心，乱砍滥伐严重等现象。这就严重影响了山区的绿化进程。针对这个问题，重新选择石榴、黄连木、文冠果等既有生态环境效益，又有较高经济效益的树种，不但很快绿化了荒山，又使农民增加了收益。农民管理山地的积极性空前提高，这样就保证了山地林业生态工程的稳定与高效益。

3. 群落建造工程

林业生态工程建造可以分阶段进行，利用人工种群建造本身逐步改善环境质量，使系统由低级向高级逐步过渡，尤其是在生态环境严酷的地带更应如此。我国大多数地区森林破坏历史很长，生态环境退化严重。针对当前环境水平，建造适当的植被类型，通过人工干预和植物群落对环境的影响和改良作用，逐步恢复起高水平的人工生态系统(云正明等　1999)。

4. 食物链工程

食物链工程是人工森林生态系统生物群落建造的组成部分，是用人工食物链种群来

代替天然食物链种群的一种工程置换措施。在生态工程中，食物链加环是一重要方法，其概念是：根据物质能量通过食物链发生“浓集”及生物之间“相生”“相克”的原理，以人工生物种群来代替自然生物种群，从而达到废弃物的多级综合利用，增加高能量高价值的产品生产和抑制能量物质损失的生物工艺过程。具体包括食物链的生产环、增益环、减耗环、综合环和加工环。生产环可使非经济产品或废物直接生产出为人利用的经济产品；增益环可加大或提高生产环的效益；减耗环可削弱或抑制损耗环的功能；综合环具有生产、增益、减耗等多种功能；加工环直接决定着不同系统的功能，对经济效益，生态环境及社会效益有很大影响。

加工环可改变食物链(或生产流程)结构，扩大并增加系统的生态环境及经济效益，以发挥物质生产潜力，更充分利用原先尚未利用的那部分物质和能量，促使物质流与能量流的途径畅通。如以生产玉米的副产品玉米芯生产木糖醇或糠醛，其残渣培养食用菌，培养食用菌后残渣再培养蚯蚓、蚓粪再作为优良有机肥还田；秸秆经微生物发酵提高蛋白质含量，降低不可消化成分，再作为饲料，饲养草食性家畜、家禽、鱼等，其粪便用于生产沼气作为能源，沼液沼渣生产有机无机复合肥，作为商品肥回归农田。

(四) 林业生态工程的类型

根据工程目的作用，林业生态工程可分为六类，如图 12-4 所示。现简要介绍以下几种：

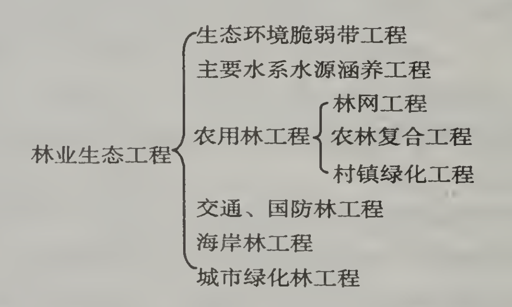


图 12-4　林业生态工程分类(引自云正明等　1998)

1. 水源涵养工程

我国保护森林植被，控制和治理水土流失的历史，可溯源到西周初期。劳动人民在开山种地的同时，就注意防止水土流失，西汉时已出现了梯田的雏形。南宋朝代，高山梯田在南方出现并迅速发展。明代水利专家徐贞明在《潞水客谈》中就提出了“治水先治源”的理论(由文辉　1998)。

目前，为合理利用山地，在贫瘠的侵蚀坡地营造水土保持林，采取工程(整地)措施，改成缓坡地，而后进行造林种草。主要有以下几种类型：① 乔木纯林水保林；② 乔、灌型水保林；③ 乔、灌、草型复层水保林；④ 乔木混交型水保林。正确地选择水保植物，合理地进行组合和配置，逐步建立起一个协调稳定的多植物种类组成、多层次结构的立体植物群落，是提高植被覆盖、固土改土的主要利用方式，也是水土逐渐

转为良性循环的中心环节。

2. 农林复合工程

农林复合系统是指在同一土地管理单元上，人为地把多年生木本植物(如乔木、灌木、棕榈、竹类等)与栽培作物(如农作物、药用植物、经济植物及真菌等)和(或)动物，在时空上进行管理的土地利用方式和技术系统的综合。建立农田防护林体系，实现农、林、牧相结合的"生态系统耕作制"，即林木护养着农田和草地，并为牧业、农业发展提供了资源和资金，牧业为农田、林地提供了有机肥。如自 20 世纪 60 年代以来，在我国华北地区，特别是黄淮平原农田，农桐间作不断发展，并已成为该地区平原绿化的主体。

3. 海岸林工程

海岸林，即护堤护岸林具有削弱风浪、降低流速、防止冲刷、淤积泥沙、维护堤坝、巩固河岸的作用，是沿江海滨湖人民为固堤护岸、抗御水患灾害、改善生态环境 、保障农业生产而采取的生态工程措施，也是平原绿化与农田防护林体系的组成部分。

4. 城市绿化林工程

营造城市绿化林的主要目的是为了保护环境、净化大气、美化生活环境和增进人们的身心健康。保护环境和点缀风景经常是结合在一起的，但在不同的地方各有其侧重。 在大型疗养区周围营造以保健为目的的人工林，最好选用能挥发具有杀菌能力的分泌物的树种，大部分松属及桉属的树种都具有这种能力；在大型厂矿周围，特别是在会产生有害气体的厂矿周围营造人工林时，要选择那些对污染物的抗性强而且能吸收(附)这些污染气体的树种。另外，考虑到城市美化的要求及游玩和休息活动的需要，造林树种应具有发叶早、落叶晚、树形美观、色彩鲜艳、花果艳丽等特性，而且最好是不同树种交替配置，以免形成单一呆板的环境。在城市绿化中，还可发展垂直绿化和楼顶绿化，以增加绿化覆盖率(详见第四章)。

(五) 古今世界主要生态工程实践

1. 我国古代主要林业生态工程

中华民族历史悠久，据古籍记载，在商周时代就有了人工用材林、特种经济林、果树以及和农作物相匹配的林业生产经营项目。《致富全书》里说："山中植者斩伐后放火烧山，驱牛耕转，则火灰压下，土气渐肥，然后插种。"这说明我国各地在杉木造林时采用的"炼山"、"挖山"的环境整治工程已有很久的历史。现在流传的"火不上山，不能插杉"的农谚大约就起源于那时；而早在 1300 年前的《齐民要术　种桑篇》里，较早地出现了种群匹配工程雏形。书中写道："(种桑)其下当掘绿豆、小豆。"这样能达到"二豆良美润泽益桑"的目的；但是"种小豆，欲得逼树"这样才能达到"不失地

利， 田又调熟”。这在种群匹配的同时，又充分利用了不同植物种间共生互利的关系。此外，我们的先人还自发地利用食物链工程，创立了一些高效益良性循环的林粮牧结合模式。如清朝的《高明县志》里记载：“将洼地挖深，泥覆四周为基，中凹下为塘，基六塘四，基种桑，塘蓄鱼，桑叶饲蚕，蚕粪饲鱼，两利俱全，十倍禾稼。”这种人工调控水土、合理安排生物种群的技术，一直传到现在，并且出现了“花基鱼塘”、“蔗基鱼塘”、“草基鱼塘”等多种形式。

2. 国外主要林业生态工程

1948 年苏联实施“斯大林改造大自然计划”，即“苏联欧洲部分草原和森林草原地区营造农田防护林，实行草田轮用，修建池塘和水库，以确保农业稳产高产计划”，历时 17 年营造各种防护林 570 万 hm^2，在欧洲东南部，营造了 40 万 hm^2 橡树用材林；1934 年，美国实施“大草原各州林业工程”。该工程用了 8 年时间，造林 30 万 hm^2，实行带网片点相结合，防治了土地沙漠化，保护了农田和牧场；1970 年，北非的摩洛哥、阿尔及利亚、突尼斯、利比亚、埃及等 5 国政府，用了 20 年的时间营造各种防护林 300 万 hm^2，制止了撒哈拉大沙漠的飞沙移动，控制了水土流失，保障了农牧业的发展和人民对木材的需求。

3. 我国当前主要林业生态工程

我国是世界上水土流失最严重的国家之一，土地沙化也表现得十分突出。为此，我国十分重视林业生态工程的研究建设，特别是世界瞩目的五大防护林生态工程——三北(华北、西北、东北)防护林体系、平原和太行山两大绿化工程，计划从 1978~2050 年，人工造林 948 600km^2。至 1997 年，我国人工造林保存面积已居世界第一，累计达 342 500km^2；森林覆盖率从 50 年代的 8.6%上升到现在的 13.9%；1988 年，我国政府决定用 23 年的时间建设中国沿海防护林体系，规划造林 35 600km^2，使沿海地区有林地面积增加到 90 000km^2，森林覆盖率达到 39.1%；为了保持水土、涵养水源，实现长江流域自然生态良性循环，发挥森林生态经济效益，促进农业发展和山区人民脱贫致富，避免长江变为第二个“黄河”，我国“七五”计划明确提出要“积极营造长江中上游水源涵养林和水土保持林”。除此之外，从 1996 年起，我国还将陆续启动黄河中游防护林、淮河太湖流域防护林、珠江流域防护林和辽河流域防护林四大防护林生态工程，以在全国范围内形成布局合理、功能齐全的林业生态屏障。

(六) 林业生态工程实例

海岸带复合农林业是农林复合生态系统的组成部分，它按照沿海地区的自然条件和经济特点，从大农业的总体利益出发，以林作为防护屏障，发挥复合生态系统抵御自然灾害、防风固沙、保持水土、保护农田等生态效能，又能以市场经济为导向，发展“高产、 优质、高效”农业。以山东省海岸带复合农林业生态工程为例(魏勇，赵永艳等 2000)说明。

1. 海岸带防护林体系概况

解放前，山东省沿海地区森林植被稀少，水土流失严重，生态环境恶劣，台风、风沙、海潮等自然灾害频繁，风沙灾害常侵蚀土地，埋没良田和村庄，百姓民不聊生。20世纪 50 年代以来，沿海地区广泛开展了封山育林、人工造林等一系列营造沿海防护林的工作。在“八五”期间，全省沿海地区 17 个平原县全部达到了平原绿化标准，基干林带已初具规模，片林面积达 60 万 hm^2，用材林 3.3 万 hm^2，经济林 30 万 hm^2，林网和间作控制农田面积 47 万 hm^2，占适宜农田面积的 60%，林木总覆盖面积达 71 万 hm^2，森林覆盖率 17.0%，该地区已初步形成了乔、灌、草一体，网、带、片结合，社会、经济、生态三大效益同步的沿海防护林体系。

2. 各种海岸带农林业经营类型及优化模式的选择

沿海地区由于立地条件、经济状况的不同，各种海岸带农林业经营类型有很大的差别。大体可分为三种类型，每一类型包含多种不同的模式(表 12-2)。按照生态与经济效益并重，历史与现实相联系，科研与实践相结合，技术与生产相衔接的原则，选择具有较长栽培历史和一定生产规模的优化模式。

通过调查与研究分析，选择以下模式作为山东省海岸带农林复合生态系统的优化模式：泥质海岸以“封育保护自然盐生植被-基干林带-农田林网(包括沟、路、渠绿化)-枣粮间作”为主要模式；沙质海岸、基岩质海岸以“基干林带-农田林网和梯田地堰绿化-果树经济林-山区水土保持-水源涵养林”作为主要模式。各地区可以根据自然条件和经济状况，因地制宜地选择具体的适宜模式。

表 12-2　各种海岸带农林业经营类型及模式

经营类型	具体模式
生态型	封育保护自然盐生植被和草甸植被模式 封育保护自然植被与人工栽植大米草、柽柳、白刺结合模式 沿海滩涂黑松+灌丛防护林模式 封山育林与营建防护林相结合的模式
经济型	沙滩经济果树模式 山地、丘陵经济果树栽培模式 以盐业生产为主的模式
生态–经济型	沿海基干林带与农业生产结合模式 基干林带与经济林结合模式。该模式经济效益最大，是使经济、生态效益都能得到充分发挥的模式 基干林带-梯田地堰绿化-经济林-水土保持、水源涵养林模式 高投入、高产出，种、养、加相结合的模式

3. 优化模式的营建

根据所选优化模式，选择适合各海岸的树种。如泥质海岸选择柽柳、枣树、绒毛白蜡、桑树、刺槐等，沙质海岸、基岩质海岸选择黑松、赤松、刺槐、火炬松、杂交杨等。对滩涂、潮间带植被恢复采取以封为主，封育结合的措施。泥质海岸以营造以柽柳为主的基干林带，从现有林带的防护效果看，营建的林带宽度应在 500 m 左右。沙质海

岸以设置宽度 100 m 以上的乔木型或乔灌型的基干林带。农田林网建设应缩小林带间距，加大林网密度，采用“小网格、窄林带、疏透型”设计，改善网带结构和配置方式，扩大防护功能。在沿海适宜地带，因地制宜地规划营建经济林、用材林片林，实行枣粮间作，达到生态与经济效益的充分发挥。最后以“四旁”植树为主体，做到绿化、美化、香化配套，建立现代化花园式新农村。

沿海防护林工程是我国 20 世纪六大生态工程之一。山东海防林工程体系建设是全国海防林工程的组成部分，也是山东省林业建设和社会经济发展的重要内容。海防林建设的成效，对于全国的海防林工程建设和全省社会经济的发展都具有重要影响。

三、草地生态恢复与生态工程

(一) 草地资源概况

世界草地总面积约 50 亿 hm^2，占陆地总面积的 33.5%，其中人类已利用的永久性草地 33 亿 hm^2，占陆地总面积的 25.3%。我国是一个草地大国，有草地 3.93 亿 hm^2，约占国土面积的 41%，为现有农田的 4 倍左右。草地不但是地球上主要生态系统类型，而且是人类重要的可更新资源。一方面，它为草食动物提供食料；另一方面，它对保持水土、维持土壤肥力、改善环境及维持地球表面生态平衡等方面均起着重大作用。

(二) 草地资源类型及其存在问题

我国草地按其所处的自然条件可分为四大类，即温带草原、高寒草甸、荒漠区草原和南方草山草坡。由于自然干扰和人类活动的影响，草原生态系统出现了大面积的退化、沙化和盐碱化，草地资源日益衰竭，草原生产力不断下降。据有关部门统计，我国退化、沙化和碱化的草地资源大约占草地总面积的 1/2。

1. 温带草原及其存在问题

温带草原主要分布在北温带半干旱区，包括内蒙古高原、黄土高原与松辽平原，面积 10 666.7 万 hm^2，为我国北方重要牧区之一，从东往西，随雨量的减少，依次出现草甸草原、典型草原与荒漠草原。

由于过渡放牧和不合理开垦以及其他一些人为干扰活动，我国北方草原大面积沙化。如内蒙古自治区 1947 年解放时，拥有牲畜 1925.8 万只绵羊单位，平均每只占有草场 4.1hm^2，利用强度很低。此后牲畜头数逐年增长，至 1965 年达 7327.8 万只绵羊单位，已超过天然草场的承载力。在过牧利用的反作用下，此后 20 多年牲畜头数一直徘徊不前，随年际气候变化大起大落，恰恰在这一时期发生大面积草原退化。而在典型草原区，由于大面积的垦殖，再加上气候干旱，基粒较粗，开垦后土壤肥力迅速耗完，种植几年之后就开始撂荒，另开新田种植，形成一种撂荒耕作制度。在这种情况下，生产力极低，沙化面积逐年扩大，埋没了大面积草场。正如当地群众所形容的“地面无植

被，沙子到处跑，种田不促苗，养畜没有草”。总之，草原生态系统昔日的“风吹草低见牛羊”的优美景观，已逐渐变为低矮稀疏植被甚至是成片的沙地和沙丘。

黄土高原灌丛草地在历史上曾经是一片水草肥美、植被繁茂的森林草原。但由于人类无限度的开荒与垦殖，草地植被开始退化和沙化，水土流失非常严重，引起区域性生态破坏。目前，黄土高原地区许多地方已无植被覆盖，淋溶侵蚀、击溅侵蚀和坡面层状侵蚀普遍发生。据陈安仁报道，黄土高原沟壑区土地每年有 7~10mm 厚的表面被冲走， 等于每公顷流失 60~75t 土壤。黄河下游淤沙绝大部分来自黄土高原。

2. 高寒草甸及其存在问题

高寒草原主要分布在青藏高原，一般海拔 4000m 以上，面积 12 666.7 万 hm^2，是世界上最为特殊的一类草地。

由于高原寒旱的严酷生态条件，自然灾害频繁，抗灾能力弱，再加上过度放牧，造成草地生态平衡失调，切断了食物链，鼠虫害畸形发展，使西藏牦牛、西藏绵羊和西藏山羊等抗逆性强、耐粗饲的地方品种生产能力降低，死亡率提高，草地畜牧业既不高产也不稳定。

3. 荒漠区草地及其存在问题

荒漠区草地分布于新疆、柴达木与阿拉善，以山地草原、山麓草地和荒漠绿洲为主，面积约 6000 万 hm^2。

由于过度放牧、开垦和砍伐挖掘，再加上愈加恶劣的自然条件，荒漠植被遭受严重的破坏，致使沙漠扩大。例如位于内蒙古与宁夏交界的阴山之南，贺兰山之北，紧靠黄河西岸的乌兰布和沙漠。据侯仁之考证，在公元前 127 年乌兰布和沙漠北部过去是一片草原。但自汉代至清代，民国大规模开垦后，该段黄河西岸几乎全变成流沙，即今日的乌兰布和沙漠。而最近几十年仍在迅速扩大，这是与今日还继续破坏植被有直接关系。在这个地区设置农垦农场，开垦、放牧和砍伐，其后果是将“人造沙漠”与原有的大沙漠连成一片，沙漠面积越来越大。1964 年乌兰布和沙漠的梭梭林分布面积为 22 万 hm^2，占该沙漠总面积的 17%。而今梭梭林只有残存的稀疏枯木，破坏殆尽。风沙起处，覆盖耕地、牧场和居民点。

分散在大面积严酷自然环境中，水草丰美、土壤肥沃的一种自然景观“绿洲”，被人们称为荒漠中的无数“明珠”多是当地重要的种植业基地。但是，由于对绿洲水土及植物资源的不合理开发利用，加上气候干旱，风大等人为和自然的干扰作用，造成从绿洲边缘开始的沙漠化现象日趋严重，导致绿洲生产力降低。位于河西走廊中部的临泽绿洲，该绿洲北部边缘的流动沙丘蜿蜒长达 40 余公里，覆盖面积 1200hm^2，绿洲农田土壤年风蚀深度达 3~5mm。同时还由于灌溉制度不合理和灌排系统设施不完善，引起部分土地出现盐渍化(周寿荣　1996)。

4. 南方草山草坡及其存在问题

南方草山草坡处于水热条件较好的森林区域，多为森林破坏后的次生草地及海拔较高的中高山草地，面积约 6666.7 万 hm^2，多未开发，有一定的生产潜力。

由于地形起伏大，土层薄，在滥垦、樵采等影响下，草山草坡成为继北方黄土高原之后的又一水土流失严重地区。北方被冲刷的黄土形成了黄河，南方被冲刷的红黄壤形成了“赤水”！据报道，目前长江流域水土流失面积已占土地总面积的 40%左右，30 年来，该区域水土流失面积正以每年 1.25%~2.5%速率递增。一些熔岩地区，上百万年形成的薄层土壤已被冲刷殆尽，形成了光秃秃的卧牛石，因失去土壤再生能力而形同“石漠”。严重的水土流失不但破坏了土地生产力，而且抬高了河床、湖底，淤积水库，降低湖泊及水库的调蓄能力及工程效益，导致频繁的灾害。

(三) 草地生态恢复与草地生态工程内容

为合理开发利用草原，防止生态环境进一步恶化，使草地资源得以永续利用，开展草地生态恢复工程是一项非常重要的内容(吴文良等 1996)。

1. 改良天然草场

1) 改善草地土壤通气状况。草地因长期受牲畜践踏及水、热、生草土发育等影响，使土壤紧实，通气状况恶化，影响牧草产量和质量。可用拖拉机引松土工具耙切、浅翻土地、划破草皮。一般划破草皮 10~15cm，以切破草皮和稍使土壤松动为宜，不可使草皮翻转，划破草皮后结合补播、灌溉等措施。

2) 草地补播。补播能使牧草种类丰富，增加草层覆盖度，改善牧草品质，增加产量，是更新复壮草地植被的一项重要措施。一般在春、秋进行。小面积可用人工撒播，畜力播种机等，大面积多用飞机撒播。如在云南省滇东北、滇西北地势平坦开阔，相对集中连片，便于开展飞机播种牧草的地方实施飞播牧草项目。它是快速治理退化草地，建立高产草地的有效方法，具有面积大、速度快、作业范围广的特点。一般选用白三叶(*Trifolium repens*)、鸭茅(*Dactylis glomerata*)、多年生黑麦草(*Lolium perenne*)等牧草品种。

3) 封山育草。将草地在一段时间内封闭起来，使优质牧草得到恢复和发展，有利于牧草自然更新，大面积提高产量。如云南高寒草甸处于海拔 3800m 林带线以上、4500m 以下的区域。该区海拔高，气候恶劣，产草率低，草地耐牧性差，生态极度脆弱，但它是重要的生态屏障，调节云南气候，又是长江、金沙江、澜沧江等流域的源头和上游，不仅对流域内的生态环境和经济社会产生深远影响，还将对中、下游地区产生重要的防护作用。该区应以保护草地天然生态系统为主，加强草地植被保护与恢复，涵养水源，作为生态功能保护区，采取封育、禁牧，防止不合理开发。退化严重区域应人工补植优良野生草和人工草种，迅速恢复其生态功能。

2. 建设人工草场

1) 建设围栏(草库伦)。把草地用篱障拦围起来，进行有目的的建设和有计划的利用。这是我国牧区建设人工饲料基地的一种创造。围栏建成后，要进行内部建设，使草、水、林、机配套，成为现代化牧业的生产基地。

2) 建设人工草地。人工草地是建植速度最快，当年覆盖最佳的优质高产草地，它是合理开发利用草地资源、发展草地畜牧业的重要措施，也是衡量草地畜牧业发展水平高低的一个重要标志。建设重点放在中海拔和低海拔平缓丘陵，相对连片的退化草地、撂荒地、开垦草地、退耕地。根据草地不同利用目的和方式，选择不同的牧草品种和组合，建植高产、优质的刈割或放牧草地。我国东北地区正在发展羊草人工种植，西北地区发展披碱草属牧草的种植，其他地区对苜蓿属、草木樨属、无芒雀麦等的种植都取得较好成效。

3) 林草结合模式。对自然条件恶劣，干旱严重、植被覆盖率低的地方，应采取草灌乔结合办法。在牧区提倡造林，在造林区提倡种草和实行林间合理放牧，做到林牧结合。特别是在造林较困难的地方，先种草，迅速恢复草地植被，改善环境条件，降低土壤水分蒸发，改善土壤结构后，再分别种灌木、乔木，形成草灌乔相结合的生态类型。如在温带、暖温带的果树间套种白三叶、红三叶(*Trifolium pratense*)、苜蓿(*Medicago sativa*)、鸭茅、黑麦草等；在亚热带、北热带果树间种柱花草(*Styloanthes guidnesis*)等，既充分利用了土地，又为草食畜解决了饲草，促进草地畜牧业的发展；豆科牧草对果树生长也有促进作用，提高了土地的综合效益；在草地的山脊、山岗、风口处以及草地四周，种树建防护林带，为草地创造了良好的小环境，保护草地。

(四) 应 用 实 例

1. 凉山退化草场恢复生态工程

四川省凉山彝族自治州地处青藏高原和云贵高原之间，位于长江中上游，属川西山地。建国初期，由于牲畜数量少，草场不超载，基本无退化现象，林木、草地交错，各种植物生长茂盛。20 世纪 80 年代开始，由于重农轻牧，全州耕地面积增加了 19.67 万 hm^2，特别是在坡度 25°以上开荒，加剧了雨水对草场的冲刷，使土层变薄，肥力下降，严重的成为“溜石滩”，沦为不可用土地。到 90 年代末，由于人口的增加及消费水平的提高，刺激了畜牧业的发展，草食牲畜的数量急增，而天然草场面积由于自然和人为的原因在不断减少，草场超载严重，天然草场的生产力远远跟不上牲畜数量的增长，因而草场出现掠夺式放牧，植被根本无法得到恢复，最终造成草地退化。据 1998 年调查，全州退化草场面积已达 54.84 万 hm^2，占草地总面积的 23.4%。

为了合理利用和建设草地，州政府于 1997 年落实草场责任制。在此基础上，结合西部大开发，尽快实施退耕还林还草的“天保工程”。将 25°以上的耕地退耕还草后，采取围栏、封育、除杂、补播等措施，在承包的天然草地内选择一些既能作饲料，又能保持水土的植物进行种植[经过对多种植物种植研究认为：在坡度 25°以下时，种植光叶紫花苕 (*Vicia villosa* var. *glabrescens*) 效果最佳，在坡度 25°以上时，种植皇竹草 (*Pennisetum sinese*)效果最佳，其根长 2.5m 以上]，使被破坏的植被得以恢复，草场中的优质牧草得以生长。据测经封育改良后的草场，牧草产量由原来的 4500kg/hm^2 上升到 15 000kg/hm^2，既增加了植被覆盖度，又减少了水土流失。不仅如此，群落结构也发生了变化，如对大青山封育一年后的草地测定，封育前禾本科植物占 33.3%，豆科占

4.8%，杂类草占 61.9%，而封育后禾本科上升到 85.3%，豆科上升到 6.5%，杂类草降为 8.2%。可见天然草场经封育后数量和质量都有明显提高。

目前，凉山天然草场严重超载，天然草场的综合利用比重由 20 世纪 80 年代的 59.51%下降到 35.11%，严重制约了畜牧业的发展。为此从 1995 年起实施草蓄“双百万工程”，即实行粮草轮作，每年利用冬闲地种植 6.67 万 hm^2 以上优质豆科牧草，以解决冬春牲畜缺草问题，这在很大程度上缓解了草畜矛盾。1998 年底全州种植光叶紫花苕面积达 8.27 万 hm^2，年可提供优质豆科牧草 186 亿 kg，能保证 310 万个羊单位牲畜的冬春牧草需求量。人工种草工作的开展，使人工草场的综合利用比重由 1980 年的 0.33%提高到 30.62%，净增 30%，人工种草既是对畜牧业的一大贡献，也是对草地生态保护的一大贡献，不仅解决了因天然草场退化带来的草畜矛盾，还能涵养水分，防止水土流失，使冬春的田野能够变为一片绿色，获得良好的生态效益(何萍等 2001)。

四、废弃土地生态恢复与生态工程

(一) 土地资源概况及废弃地现状

土地资源是生态系统中最为宝贵的资源和人类及其他生物的栖息之地，是人类生产活动最基本的生产资料和生活资料，提供了人类 3/4 的食物和全部的木材。废弃地系是指非经治理而无法使用的土地，造成废弃地的主要原因是工业、生活废弃物的堆积，开采和挖掘的废坑道，拆迁的工厂遗留下的杂乱无章的场所和破旧建筑，以及沙漠化土地和盐碱化土地等。

1. 土地沙漠化

我国沙漠和沙漠化土地的总面积超过 1.3 亿 hm^2，占总土地面积的 13.5%。这些沙漠化土地主要分布在西北干旱、半干旱地区。在过去的几十年里，土地沙漠化愈演愈烈，如位于鄂尔多斯高原南缘半干旱地带的毛乌素沙地，一直受到沙漠南移运动的影响。在过去的 300 年中，由于自然植被的加速破坏，一个约 60km 宽的移动沙带已出现在长城沿 线。

2. 土地盐碱化

我国有 3667 万 hm^2 盐碱土，占世界盐碱土总面积的 3.85%，列世界第四位，主要分布在西北、华北、东北及滨海地区，大面积成片集中在我国北方干旱、半干旱、半湿润地区，成土条件复杂，类型多样。盐碱地主要是由于干旱地区过度灌溉以及不适当排水所致，不仅破坏了当地的生态环境，也使当地粮食产量低下，农民生活贫困。

3. 矿区废弃地

我国采矿占用的土地面积约 200 万 hm^2，并以每年 2 万 hm^2 的速度递增。矿产的开采造成土壤及植被的破坏，无论是表层开采还是深层开采都造成土壤被大量迁移或被矿物垃圾堆埋，造成了整个生态系统的破坏。开矿后还可引起地面的塌陷，引起地下水的

变化，污染环境，严重破坏了当地的生态环境。

4. 水土流失

我国是世界上水土流失最严重的国家之一，土壤侵蚀总面积大于 1.5 亿 hm^2，占总土地面积的 15.6%。黄土高原是我国和世界上水土流失最严重的地区，年输入黄河的泥沙量达 16 亿 t，而且仍有加重的趋势。由于水土流失，造成泥沙淤积，使黄河下游的河床每年以 8~10cm 的速度在增高，目前黄河下游处于悬河状态，河床高出地面 5~10m，严重威胁下游的安全。地处黄土高原东缘，黄河中游的山西省，是全国水土流失严重地区之一，据水保部门统计，全省水土流失面积 0.11 亿 hm^2，占总土地面积的 69%，全省年平均输沙量 4.56 亿 t，平均输沙模数 3000t/(km^2·a)，最高达 20 000t/(km^2·a)，平均年冲蚀表土 0.24cm。强烈的水土流失不仅使地表切割的支离破碎、沟壑纵横，而且带走了土壤中大量的氮、磷、钾等营养元素，使土层变薄、土壤贫瘠、可耕地面积减少，土地生产力逐渐降低，农业陷入“越垦越穷、越穷越垦”的恶性循环之中。可以说水土流失是制约山西乃至整个黄土高原经济发展和生态改善的一大问题。

（二）废弃地恢复生态工程内容

1. 沙漠化土地治理工程

沙漠化对生态环境的破坏非常严重，沙漠的生态条件十分恶劣，因此沙漠的治理也就非常困难。国内外实践证明，植物治沙或称生物治沙，是固定流沙、阻截流沙和防治土地沙漠化的基本措施。随着生物治沙而发展起来的机械沙障(人工沙障)和化学固沙制剂，为稳定沙面，在沙丘和风蚀地上建立人工植被或天然植被创造稳定的生态环境。

1) 植物治沙。植物治沙主要包括建立人工植被或恢复天然植被以固定流沙；营造大型防沙阻沙林带，以阻截外侧流沙对绿洲、交通沿线、城镇居民点及其他经济设施的侵袭；营造防护林网，以控制耕地风蚀和牧场退化；保护封育天然植被，以防止固定半固定沙丘和沙质草原的沙漠化危害。20 世纪 50 年代以来，我国西北绿洲地区大力营造防风阻沙林带、护田林网及建立人工固沙植被，同时把“封沙育草，保护天然植被”作为防沙治沙的重要措施之一，并且取得了卓越的成效。现在一般都在老绿洲迎风一侧与沙漠、戈壁、风蚀地等相毗连的地带，封育沙生植被宽度超过 1~2km，甚至 10~20km，植被覆盖度由原来的 10%~15%恢复到 40%~50%以上，成为一道保护绿洲的绿色屏障(朱震达等　1998)。

2) 机械固沙。在治理沙害的长期实践中，通常采用大面积固定流沙表面的办法，其中以各种材料(如麦草、芦苇、粘土和砾石等)做成不同规格的格状或带状沙障应用较为广泛。一般来说，带状沙障主要用于防治风向较为单一的沙害，而格状沙障多用于防治多方向风作用下所造成的沙害。在固沙带的前沿设置高立式栅栏工程措施，阻拦沙源，并使之形成高大的阻沙堤，能起到防止前沿积沙的作用。障高与障宽之比保持在 1∶10 左右为好，最常用的规格为 1m×1m，既经济又有效，材料应因地制宜就地取

材。

3) 化学固沙技术。化学固沙是有机或无机、天然或人工合成的胶结物质，喷洒于沙面并渗入沙层孔隙，经固化后形成防风蚀保护壳。化学固沙是 20 世纪 30 年代以后发展起来的固沙新技术，但由于成本高，目前仅用于风沙危害严重、造成重大损失的地区，如机场、交通线、军事设施等地区。前苏联、美、英、以色列等国曾先后用石油产品(重油、沥青等)、合成高分子聚合物(聚丙烯酰胺类、甲醛树脂、丁二烯-苯乙烯橡胶乳等)作固沙剂，而以沥青乳液使用最广，因其在常温下具有流动性，便于使用(杨文宪等 1999)。

4) 衬膜种稻。这一措施是中国科学院兰州沙漠研究所新研究成功的，在有水源的沙漠边缘地区，用沙漠衬膜种稻技术可以实现 9000kg/hm^2 的产量，并变沙漠为良田，这是逐步改变沙漠化有战略意义的一项措施。具体做法：① 先划畦，平整地 根据地形、水源、塑料膜大小等对沙漠土地划畦，平整土地，划畦时，四周要有较高的堰。② 衬塑料膜 划好畦后，用一完整无损，没有间隙的塑料膜铺在地上，以防水漏渗。然后在塑料膜上覆盖沙土，配合施用有机肥、化肥作底肥。③ 灌水、插秧种稻。

2. 盐碱地改造工程

盐碱土形成的中心问题是含盐地面径流的汇集和地下水状况的恶化，这是由于地面地形低洼和地下潜水的流速不畅引起的矿化度增加，并在其临界深度以上进行土面和土体的蒸发积盐的结果(杨文宪等 1999)。因此，盐碱土的改良利用也必须针对这些特点，进行以改善地面化学径流和地下潜水状况为主体的改造措施，主要有改善农业条件的工程措施，改善农业生产条件的生物措施，提高农业产量的农业措施和相应的水盐监测和预报措施(表 12-3)。

1) 工程措施。主要为改善农业生产基础条件所实施的治水、改土等农田水利工程措施，诸如排水、灌溉及其配套建筑物的建设，土地平整，淤灌等。排水包括沟排、管排和井排，排除地表的洪、涝积水，土壤中的咸水和浅层高矿化度的地下水，降低地下水位；灌溉包括井灌、河灌和洪灌，解决干旱；改土包括平整土地，深翻、引水淤灌及化学改良等。

2) 生物措施。利用某些植物具有耐瘠薄，耐盐碱，抗旱、耐涝等特性，因地种植，以改善生态条件，逐步提高土壤肥力，达到增产目的的措施。

3) 农业措施。在改造盐碱地的过程中，工程措施为农业生产发展提供了基础条件，而农业措施则是综合治理和综合发展的中心环节。它旨在经济、合理地利用自然资源，提高农作物的产量和品质，促进农业发展。其主要内容是：因土种植，调整种植结构和农业结构，如黄淮海地区在通过工程措施消除了盐碱限制因子后，开始通过合理轮作、施肥、用养结合、配肥土壤，大力提高土壤肥力和土地生产力；在初级生产力达到一定程度后，开始全面调整农业结构，采用先进技术及提高管理水平，发展畜牧业以及加工业等。

表 12-3　盐碱化防治措施类型

改良方法	具体措施	适用地区和适用条件
水利改良措施	明沟排水	适于所有盐碱化地区，应有排水出路
	暗管(暗沟)排水	适用有排水出路的盐碱化地区，选用陶瓷、混凝土管、瓦管、木管、石料等材料制成暗管
	井灌井排	适用地下水质较好，出水量大的地区。需要一定的资金和动力条件
	竖井竖排	适用于地下水质较差的地区。需要一定的资金和动力条件
	灌水冲洗	适用有灌溉条件和淡水水源的盐碱化地区，但应注意水质和防止碱化
	种稻洗盐	适于低洼易涝盐碱化地区。应有灌溉水源保证，有一定的排水出路
	沟洫台、条台	适用地形低洼，地下水位较高的地区，在排水条件较好和土质较黏的条件下，改良效果更佳
	围埝蓄淡	靠天然降水压盐，多用于耕地多、盐碱重、缺肥料、暂无灌溉条件或水源不足的地区。应注意土壤碱化并采取相应的措施
农业改良措施	平整土地	是创造均衡压盐脱盐的基础和前提，并能省水增产，普遍适用于所有盐碱化地区
	多施有机肥，秸秆还田	在广辟肥源和秸秆较丰富的前提下，普遍适用各地
	合理耕作，晒垡养坷垃，深播浅盖	根据具体情况，灵活运用各种耕、耙、锄、压等措施
	深翻改土(深度 30~70cm)	适于瓦碱、盐分上重下轻、下层淤土较薄的盐斑或需要打透“碱隔”的土壤，并应配合施有机肥。还适于砂碱或质地较轻的滨海盐土
	盖淤改良	附近有淤土或黑土来源。适于砂碱或质地较轻的盐碱化土
	压沙改良	有沙源。适于较黏的盐碱化土或结构不良的苏打盐土、碱化土壤
	秸秆覆盖	适用于所有地区
生物改良	扩种绿肥	适于地多人少的盐碱化地区
	植树造林	适于所有盐碱化地区，应采取耐盐树种，并采取相应措施促使林木成活
	种植耐盐作物	因地制宜地种植各种耐盐作物、药材
	地面盖草	草源较丰富，一般在改良盐斑时作为绿肥立苗的辅助措施
化学改良措施	施用各种化学物质	一般适于苏打盐化或碱化土壤。使用石膏、磷石膏、煤矸石、黑矾、硫磺、腐殖酸钙、硅藻土磷肥等

3. 工矿区复垦与生态重建工程

工矿区复垦生态重建工程一般包括以下两大步骤：一是造地，它是土地复垦最基础的工作；二是种植。

(1) *矿山造地工艺*

造地包括地形再塑和土体再塑。地形的人为再塑与设计有关，不仅关系到植被工程有没有一个稳定的基础，而且关系到人为再塑的地形是否符合矿区人们的景观要求和价值取向。土体的再塑直接关系到土壤的形成和土壤的肥力水平，从植被恢复和重建角度讲，再塑土体构造必须遵循“上土下岩，粗下细上，酸碱在下，中性在上，不易风化的在下，易风化的在上，肥沃的在上”的原则。

表土的采集、储存与铺敷是造地工程的重要环节，因为采矿及工程建设人为扰动区表层肥沃的土壤是植物种植成功的关键，因此，采矿及工程建设中，一般要求妥善剥离原表土，并就近储存，与底土和岩石分开堆放，防止岩石等杂物混入，使土质恶化，尽可能做到回填后保持原有土壤结构，尤其在露天矿开采中。表土的采集大致为两类：一类在采掘后直接装载运输至应铺敷地点铺敷；一类是采掘后贮存一个时期再铺敷。表土的临时贮存有三种情况：一是在采场外或是在排土场附近贮存；二是在回采台阶上贮存；三是在先行台阶的工作面上贮存。而表土的铺敷必须先将排土场整平，有时还要铺上 1.5m 厚的有低肥效的岩石，再次整平后铺敷表土。为使排土场均匀沉降，可随着废石排弃工作线的推动随时整平，如以后又发现下沉面积超过 15~20m^2，深度超过 0.5m 时，还要填平。

(2) *矿山土的培肥措施*

矿山土是在以采矿中固体废弃物作为母质的基础上，经人为定向培肥而发展起来的。因采矿的类型以及管理技术的差异造成在同一气候条件下矿山土性质的显著差异。另外，由于矿山土中含有刚刚暴露的新岩石，各种理化及生物过程仍在剧烈地向平衡方向发展，表现出与这些有关的各种性质的不稳定性。因此，矿山土的培肥，不仅要排除限制植物生长的障碍因素，而且应随时跟踪各种性质的变化，采取相应的措施。

1) 消除酸害。酸性矿山土多发生在有酸性或产酸矿物存在的湿润气候区。目前认为，煤矿固体废弃物中二硫化铁(黄铁矿与白铁矿)是酸性的主要来源。防止产酸的措施主要是控制黄铁矿与氧的接触。在隔离氧气材料的选择上，最为有效的是土壤和水。覆土的厚度取决于土壤的物理性状、紧实度、水分含量及植被情况。但在设计覆土层厚度时，应考虑到土壤变干后氧气可能会通过孔隙和裂缝进人土体，同时应考虑水土流失的情况。植被不仅可减轻土壤流失，而且在其残体的分解过程中又需要消耗氧气，因此也是一种很好的隔离物。在酸化已经发生的情况下，进一步处理就比较困难了。目前尚无较成功的经验，其中方法之一是用各种碱性物质中和已产生的酸，如石灰乳、液氨、碳酸钠等。

2) 表层覆盖。表层覆盖在固体废弃物堆置整平后就应完成。表层覆盖对黄铁矿的氧化以及煤矸石的自燃的抑制起很重要的作用。在覆盖物的选择上，土壤无疑是最好的材料，但在选择时，应注意土壤的理化生物特性。露天矿区一般要求剥离表土分别堆置， 在回填采坑时，应将表土置于表层。在表土性状不如亚表土的情况下，也可将亚表土置于表层，但应注意覆盖土中是否会有毒或潜在性的有毒物质。一般土壤的耕层为 20~30cm 厚，但植物根系的下扎深度远远超过这个深度。在地处湿润气候区的美国弗吉尼亚所做的矿山土表土覆盖试验表明，在不施石灰的情况下，矸石山北坡覆盖土厚度小于 60cm 的小区植物覆盖率都很低，而覆土厚度为 90cm 和 120cm 的小区植物覆盖率都很高。在施石灰的情况下，无论什么坡向和覆土深度(包括不覆土的对象)的小区植被覆盖率都很高。这样看来，在类似情况下，只要采取适当的管理措施，不覆土的矿山土也可保证植物的正常生长。而在管理粗放，如不施石灰，则覆土厚度应为 1m 左右。另一方面，在土源不足或取土费用高的情况下，可采用薄层覆盖。既可节省投资，又可使作物容易出苗， 而且还可防止夏季高温季节因地表温度过高发生灼害。

3) 施肥种植。由于微生物数量少，更没有经过养分的生物富集过程，矿山土中植物必需的营养元素贫乏常常是限制其肥力及生产力的一个突出问题。建立和保持良好的养分循环体系是使土壤肥力经久不衰的重要途径。一般说来，施肥种植时应考虑以下几个问题：① 矿山土中养分的有效性；② 种植植物对养分的需求；③ 肥料对矿山土性质的影响；④ 施肥成本；⑤ 是否需要连年施肥；⑥ 水利条件。对于农用矿山土，可以参考一般农田的施肥方法。由于不断地收获作物，需要不断地补充收获物中带走的养分，需肥量一般较大。林用矿山土一般只在移植或播种时施肥，成活后一般不需要追肥。在矿山土的培肥过程中，建立良好的氮素循环体系是使矿山土从起始的高氮肥投入、低利用率向低投入、高利用率过渡的关键。施用氮素化肥是一项有效的“起步”措施。结合种植，可以使土壤有机质含量不断提高，从而增加土壤微生物的数量，使养分循环得以进行，但施入的氮肥，一般在当季或当年就耗费殆尽，常常需要不断补充才能保证植物的正常生长。种植豆科植物可以提高矿山土氮素水平及土壤肥力，在尽可能的条件下，矿山土的培肥，应立足于豆科固氮的优势，建立良好的养分循环体系。磷素营养对植物的苗期生长是至关重要的。一般情况下，在较粗质地的矿山土上可施 $112kg/hm^2$(以 P_2O_5 计)，黏质土上施 $224kg/hm^2$ 磷肥。磷肥肥效较长，可一次性施入。施入的磷肥一部分可以转化为有机态，一部分转化为植物较难利用的形态，但这些形态的磷还可缓慢释放，供植物生长所需。

4) 复垦地植被重建技术。植被重建是土地复垦的基础和成败的关键。矿区生态重建所追求的目标不仅仅是恢复原始的生态环境，而是重建一个高水平、融合了环境、经济、生态效益，比原始生态环境更高层次、更高水平、人地关系协调、可持续发展的生态系统。

工矿区植被恢复与重建工程，大体可通过两种途径实现：第一，改地适树，即主要通过人为改善立地条件，使其基本适应植物的生物学特性。其二，选树适地或改树适地，即根据待复垦地的立地条件选择或引进对各种限制因子有耐力的先锋植物种首先定居， 随着先锋植物的生长、繁殖，生境逐渐得以改善，同时其他植物种会逐渐侵入，如生长不受限制，最终将演替成“顶极群落”。这两种途径必须结合起来加以应用。

矿山土种植的植物必须具有较强的适应能力和固氮能力，根系发达，有较高的生长速度，且播种栽植较容易，成活率高。种植措施可采取直播技术、移栽技术和扦插技术等。直播多用于草灌种植，乔木少用。播前要做种子检验、催芽，以确保适时出土、出土整齐，提高其产量和质量。在矿区播种的农作物和一年生药用植物，为了有较长的生长期，都是早春土壤解冻后抢墒播种的，其他多年生植物多是在雨季来临前和雨季进行播种的，以获得较高的出苗率。移栽与直播不同之处在于移栽的苗木较大，植株生长起来封垄地面快，对于能固氮的植物和有菌根的植物，移栽时可把苗圃地内的有益菌带到新垦地内，促使植株健壮生长。有条件的矿区可适当发展自己的苗圃，既可节省资金，又可提高移栽成活率，用不完的苗木还可出卖。扦插的适宜环境是温暖湿润的气候，而矿区是既干旱又寒冷的地方，给扦插带来很大难度，但可以采取一些人工措施，如用地膜覆盖来提高地温预防寒冷，用浇水灌溉来防止干旱等。扦插有春插，秋插和夏插，落叶树以春季新芽未萌动以前扦插为好，常绿树以春末夏初或秋天扦插为好。

4. 水土流失的生态恢复工程

水土流失对生态系统的破坏非常严重，治理水土流失是许多地区生态农业建设的主要内容。小流域综合治理是现阶段我国水土保持工作的最主要形式。从流域生态系统优化的角度出发，坚持生态效益与经济效益统一、治理与开发相结合；坚持治坡与治沟结合，生物措施、工程措施、农业措施结合，以流域为单位，应用生态工程原理，实行山、水、田、林、路的综合与连续治理。基本模式是：川地水利化，沟谷坝系化，坡地梯田林草化。

小流域综合治理就是以小流域为治理单元，合理规划与布置水土保持农耕技术措施、 林草措施和工程措施，优化农、林、牧、副等各业用地结构，使各项技术措施互相协调、互相促进，形成小流域综合治理技术体系，实现以水土流失控制为核心的生态—经济—社会效益相统一的综合治理目标。

(1) 农耕技术措施

农耕技术措施是小流域综合治理的基本措施，按其性质可分为以改变微地形为主的农耕措施和以增加地面覆盖为主的耕作措施两类(表 12-4)。因地制宜地采取农耕技术措施可以改变坡耕地的小地形，增加地面覆盖，改良土壤，防治水土流失，提高农业产量，是一项投资少、费工少、见效快、效益高的蓄水保土措施。

(2) 林草措施

积极地造林种草，增加水土流失地区的植被覆盖率，是解决水土流失的强有力手段 和根本措施，同时也是恢复和改善流失地区生态平衡的物质基础。只要有机地和工程措施相结合，正确地运用生物措施，必将大大促进水土流失的治理。

表 12-4 水土保持农耕技术措施一览表

<table>
<tr><th>内容
分类</th><th colspan="2">耕作措施</th><th>适宜条件</th><th>适用范围</th></tr>
<tr><td rowspan="13">以改变微地形为主的水土保持耕作措施</td><td colspan="2">等高耕作</td><td>25°以下坡面，坡度愈陡作用愈小</td><td>全国</td></tr>
<tr><td colspan="2">等高带状间作</td><td>25°以下坡面，坡度愈陡作用愈小；坡度愈大，条带愈窄，密生作物比重愈小；条带与主风向垂直，可以防治风蚀；可作为修梯田的基础</td><td>全国</td></tr>
<tr><td rowspan="4">沟垄种植</td><td>套犁沟播</td><td>20°以下坡面，坡度愈缓作用愈大</td><td>西北</td></tr>
<tr><td>垄作区田</td><td>15°以下坡面，坡度愈缓作用愈大；等高、沟坝地、梯田均可</td><td>西北</td></tr>
<tr><td>等高沟垄</td><td>20°以下坡面，坡度愈缓作用愈大；沟设比降可排水拦沙</td><td>四川</td></tr>
<tr><td>等高垄作</td><td>15°以下坡面，坡面愈缓作用愈大；水平种植</td><td>东北</td></tr>
<tr><td colspan="2">蓄水聚肥耕作</td><td>15°以下坡面；等高、旱坪、梯田均可</td><td>西北</td></tr>
<tr><td colspan="2">抽槽聚肥耕作</td><td>15°以下坡面；等高、平地均可；造林或建经济林园</td><td>湖北</td></tr>
<tr><td colspan="2">坑田</td><td>20°以下坡面，品字排列；平地也可</td><td>全国</td></tr>
<tr><td colspan="2">半旱式耕作</td><td>在冬水田少耕、免耕条件下，掏沟垒埂，治理隐匿侵蚀</td><td>四川</td></tr>
<tr><td colspan="2">防沙农业技术</td><td>农田边缘空地翻耕；棉花沟播</td><td>新疆</td></tr>
<tr><td colspan="2">水平犁沟</td><td>20°以下坡面，坡度愈大间隔愈小；适用于夏季林闲地和牧坡</td><td>西北</td></tr>
</table>

续表 12-4

分类 \ 内容	耕作措施	适宜条件	适用范围
以增加地面覆盖为主的水土保持耕作措施	草田带状轮作	各种坡度，坡度愈大牧草比重愈大；等高种植：条带与主风向垂直可防风蚀，可作为修梯田的基础	全 国
	残茬覆盖	缓坡地、平地均可，不用翻耕	北 方
	秸秆覆盖	缓坡地、平地均可，不用翻耕	北 方
	砂田	干旱区 10°以下坡面，有砂卵石来源	甘 肃
	地膜覆盖	缓地或平地均可；种植经济作物	北 方
	青草覆盖	茶园，种绿肥也可	南 方
	少耕深松	缓坡地、平地均可；深松	北 方
	少耕覆盖	各缓坡、平地均可	云 南
	旱三熟耕作	各种坡度、带状种植	四 川
	防沙农业技术	沙、荒地种苜蓿、田埂种高粱，地边种大麻	新 疆
	免耕	用于平地，除草剂灭草	湖南，东北

引自吴文良等 1996

1) 造林的整地措施。造林地的整地措施有全面整地(全垦)和局部整地两种(表 12-5)。局部整地又分为带状整地(带垦)和块状整地。应用带状整地的方法有水平阶(条)、水平沟、反坡梯田、撩壕等。山丘地应用的块状整地方法有穴状、块状、鱼鳞坑等。正确地选定整地季节，是充分利用外界条件，克服不良因素的一项措施。在干旱、水土流失区营造水土保持林，要求提前一年整地，最少也要提前两个季节。这样可以调节土壤的水分状况，增加土壤有机质，提高造林成活率。

表 12-5 造林地的整地措施

<table>
<tr><th colspan="3">分类 \ 内容</th><th>适宜条件</th><th>优点</th></tr>
<tr><td colspan="3">全面整地</td><td>平原地区的荒地，草原，无风蚀危险的固定沙地、盐碱地及 25°以下的平缓地、水平梯田等</td><td>改善土壤理化性质，清除杂草灌木，便于机械化作业以及实行林粮间作，促进幼林生长</td></tr>
<tr><td rowspan="6">局部整地</td><td rowspan="4">带状整地</td><td>反坡梯田整地</td><td>土层深厚，坡面整齐和坡度在 10°~35°的坡面上</td><td rowspan="4">较好地改造造林立地条件，保持水土，便于机械化</td></tr>
<tr><td>水平阶</td><td>多用于 25°以下的缓坡坡面</td></tr>
<tr><td>水平沟</td><td>多用于 25°~30°较陡的斜坡</td></tr>
<tr><td>撩壕(倒壕)</td><td>干旱贫瘠的丘陵地区</td></tr>
<tr><td rowspan="2">块状整地</td><td>鱼鳞坑</td><td>干旱和黄土地区，坡度 25°以上支离破碎的沟坡及梁峁斜坡</td><td rowspan="2">灵活性大，能适应造林地多变的条件</td></tr>
<tr><td>块状或穴状</td><td>坡度小，杂草茂密，土壤水分好，水土流失不严重的坡地</td></tr>
</table>

2) 造林方法。在经过细致整地的基础上，所选用的造林树种采用何种造林方法，造林季节选择的适当与否，对于造林成活率的高低，树木生长的好坏，都有密切的关系。 常用的造林方法有播种造林、植苗造林和分殖造林三种。以种子为造林材料，直

接播种在造林地上进行造林的方法称为播种造林(直播造林)。植苗造林是以苗木为造林材料，将苗木直接栽到造林地区的一种造林方法。分殖造林是利用苗木的营养器官直接造林的一种方法，具体有插条、插干、压条、埋干、分根、分墩、分蘖和地下茎等造林方法。近年来，国内外在造林困难的地区，采用营养钵造林的方法，这种方法采用一定的小容器(如竹篓、塑料袋、硬纸等制成)，内装肥沃的土壤，每一容器培养一株苗木，培育出的苗木随容器一起造林。这种方法的优点在于苗木生长在肥沃土壤上，生长健壮，造林不伤根系及地上部分，在造林后能很快适应造林地条件，根系很快可突破容器扎入土中，苗木成活及生长都较好。

(3) 水土保持工程措施

水土保持工程措施可分为坡面治理工程、沟道治理工程和护岸工程三类(图 12-5)。

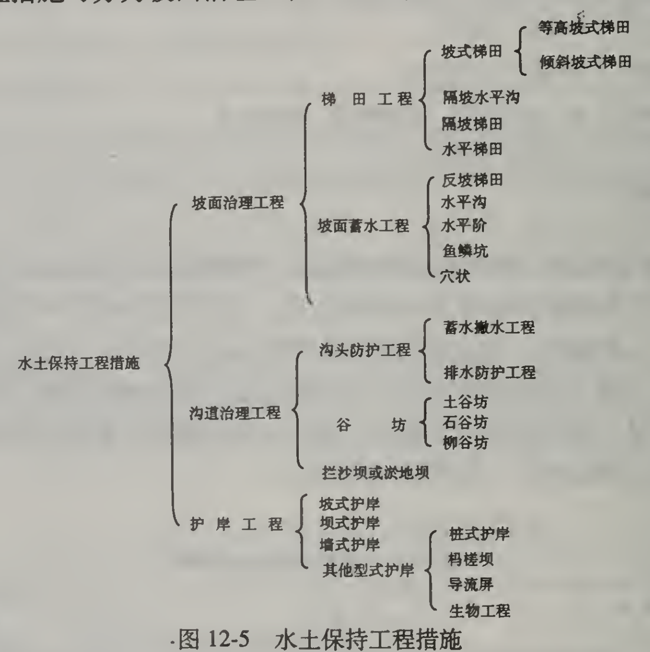


图 12-5　水土保持工程措施

1) 坡面治理工程。坡面治理工程主要是针对分水岭以下至沟缘线的坡地。梯田是坡地上沿着等高线修成的台阶式田块，是改造坡地的一项重要措施。由于地形、土壤、气候和生产基础的不同，要因地制宜的采用各种类型的梯田，它基本消除了产生强烈径流的地形条件，就地拦蓄水分，使跑水、跑肥、跑土的地变成保水、保肥、保土的梯田。坡面蓄水工程是为了拦蓄坡地的地表径流，解决流域内人畜用水或灌溉用水而采用的小型集水工程，有集水池、旱井等。截流防冲工程主要是指山坡截水沟，它是在坡地上自上而下每隔一定距离，横坡修筑的具有一定纵坡、可以拦蓄、输排地表径流的沟道，其功能是改变坡面坡长，拦蓄暴雨径流，并将其排至蓄水工程中，起到截、缓、蓄、排等调节径流的作用。

2) 沟道治理工程。采用治坡工程后，仍可能有部分径流不能控制，流入沟道还会引起冲刷，因而必须对沟道进行治理。沟头防护工程是防止因径流冲淘而引起沟头前进、扩张和沟底下切的工程措施。谷坊工程是在沟底中修建的小坝，一般修在沟底正

在下切的小支、毛沟中。主要作用是固定沟床侵蚀基点，防止沟底下切，沟岸扩展，缓洪挡沙；同时也能使拦蓄径流用于灌溉；还能拦蓄泥沙，淤积田块，使沟底逐渐川台化，以发展农业生产。各地可因地制宜，就地取材修建谷坊(谷坊断面尺寸可参考表 12-6)。打坝淤地是一项行之有效的水土保持工程措施，具有拦泥淤地、扩大耕地面积，巩固沟床，减少黄泥沙等多重效益。由于坝地是由坡面径流夹带着山坡表土汇入沟道淤积而成，土壤肥沃，水分充足，因而增产稳产，被誉为“粮仓”、“保命田”。

表 12-6　谷坊断面尺寸表

种　类	断　面			
	高度 /m	顶宽 /m	迎水坡	背水坡
土谷坊	1.0~5.0	0.5~3.0	1：1~1：2.5	1：1~1：2.0
干砌石谷坊	1.0~3.0	0.5~1.2	1：0.5~1：1.5	1：0.2~1：0.5
浆砌石谷坊	2.0~4.0	1.0~1.5	1：0~1：1	1~0.3
柴梢谷坊	1.0~1.5	2.0~4.0		
渗水谷坊	0.5~2.0	0.6~1.0	1：1	1：1.5
土礓石谷坊	1.0~2.0	0.8~1.5	1：1	1：1

引自云正明等　1999

3) 护岸工程。护岸工程是防止沟道和坝坡沿岸侧向冲刷的工程措施，堤岸经常受到水流、风浪、潮汐侵蚀、冲刷，严重的可造成失稳、破坏，以致决口失事。对这些堤段必须采取防护措施以控制、调整水流、稳定岸线，保护堤岸安全。坡式护岸也称平顺护岸，是将构筑物、材料直接铺设在堤或滩岸临水坡面以防止水流对堤岸的侵蚀、冲刷。坝式护岸是依托堤身、滩岸修建丁坝、顺坝导引水流离岸，以防止水流、风浪、潮汐等直接冲刷堤岸而危及堤防安全。墙式护岸也称重力式护岸，顺堤岸设置，具有断面小、占地少的优点，但要求地基具有一定的承载能力。堤岸防护应采取工程措施与生物措施相结合的治理方法。在经常处于水浅、流速小的堤段或堤前有宽滩的地段，受水流风浪冲刷都不是很大的情况下，一般均可采取种植防浪林、草坡护皮进行防护，在水深、流急险要的地段则需要采取工程防护措施。

(三) 应 用 实 例

1. 陕西榆林治沙工程

榆林市位于陕西省北部，毛乌素沙地的东南部，年降水量为 414.6mm，70%集中在 7、8、9 三个月，春季干旱，冬季风沙严重，是陕北一个严重沙害的地区，大致在榆林城及长城一线以北，以密集的流动沙丘、半固定及固定沙丘和河谷阶地、湖盆滩地交错分布为特色，中部以流沙、固定半固定沙丘与覆沙黄土丘陵相间分布为特色。

针对这些特点，采取以下措施进行治理：

1) 对沙质沙漠化所造成的沙害和沙丘前移埋压农田及居民点等的危害，建立以“带、片、网”相结合为主的防风沙体系，利用沙区内部丘间低地潜水位较高、水分条件较为优越的条件，采取丘间营造片林与沙丘表面设置沙障，障内栽植固沙植物如油

蒿、中间锦鸡儿等相结合的方法固定流沙，同时加强对固定、半固定沙丘的封育与天然植被的保护，使流沙处于各种绿色屏障的分割包围之中。

2) 以分布于河谷阶地、湖盆滩地中处于沙丘包围下的农田，建立以窄林带小网格为主的护田林网，并与滩地边缘固定半固定沙丘的封育，草灌结合固定流沙等措施组成一个农田防护林体系。与此同时要和滩地内的开发利用地下水，发展灌溉农业，改良低产土壤和挖渠排水等水利工程等措施相配合，组成沙质荒漠化地区内一个新"绿洲"建设体系。这种新绿洲生态系统散布于沙丘之间的丘间低地，从而使沙质荒漠化土地受到分割与包围，削弱其危害的强度。

3) 对面积较大，高大起伏密集的流动沙丘地区，采取飞播固沙植物和人工封育相结合的方法，其保存率一般为 40%~50%，最高可达 70%，3~5 年以后，即可使流动沙丘固定，并逐步形成以花棒、羊柴为主的优质灌丛草场。

4) 在地表水资源较为丰富的地区，主要是引水拉沙，改良土壤，利用河流、湖泊或水库作水源，采用自流引水、机械抽水，借流水的冲力，拉平沙丘，拦蓄洪水，引洪漫淤，垫土压沙，将起伏的流动沙丘改造成为农田及城市新区，榆林城市面积已比 1949 年时扩大了 8.5 倍。

经过治理，使大面积的沙丘处于绿色生态屏障的条条分割和块块包围之中，沙生植被和林木覆盖率由原来的 1.8%提高到 1994 年的 37.6%，固定的流沙约 3400km^2，受沙质荒漠化危害的农田 1000 km^{2}已实现了林网化，在沙区中新发展农田 660 余 km^2，利用丘间滩地海子或水库发展养鱼水面 106 km^2，恢复和改良草场 1530 km^2，取得了生态与经济上的良好效益(朱震达等　1998)。

2. 河北曲周盐碱地综合治理工程

从 20 世纪 70 年代起，北京农业大学在河北省曲周县开展了盐渍化低产区综合治理研究，取得了丰硕的成果和效益。根据多年实践，他们将其治理过程做了如下总结：

第一，条件建设，建立强有力的农业工程系统(图 12-6)。

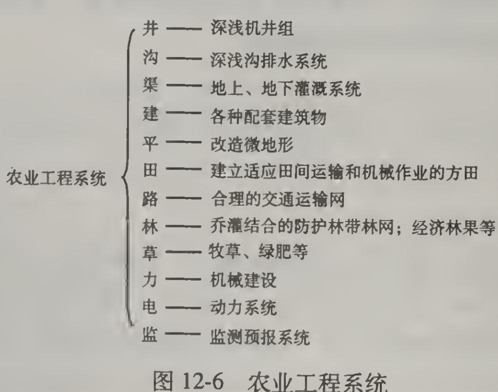


图 12-6　农业工程系统

第二，冲压洗盐，使土体不断脱盐，增加生物产量。种植绿肥牧草，如紫花苜蓿等，其较深的植物根系活动，促进土体脱盐，同时较快地增加有机质含量，种植两茬后土壤有机质可提高到 0.7%~0.8%。

第三，扩大作物种植，提高种植利用率以及改善生产管理，在提高作物经济产量的

同时，增加作物根茬的归还量，使土壤有机质得以补充，维持在 0.8%~0.9%。

第四，以作物秸秆的全部或大部直接还田并配合以化学肥料，这些新鲜有机物质除满足补偿土壤消耗外，还略有节余，促进土壤有机质的积累，提高作物产量，直至最优化农田生态系统的建成。

经过十余年的生态工程建设，当地人民生活水平有了极大的改观，形成了益于人们健康的优美环境，路林成网，水渠纵横。曲周县也一跃成为河北省经济较发达县。

3. 山西平朔安太堡矿区生态重建工程

安太堡矿区地处黄土高原东部、山西省北部的朔州市平鲁境内，与晋陕蒙接壤区、号称黄土高原“黑三角”的世界特大型煤田相连接，是一个对环境改变反应敏感、维持自身稳定的可塑性较小的生态环境系统，属黄土丘陵侵蚀生态脆弱系统。

安太堡矿区复垦土地存在的主要问题概括起来有非均匀沉降、土壤侵蚀、水分亏缺、地力贫瘠、新生土壤尚未熟化发育等。针对这些问题提出并实施了半干旱黄土区露煤矿土地重塑、土壤重构和植被重建一体化的综合集成技术。

(1) 土地重塑

土地重塑是指从工程复垦角度进行合理的地貌重塑和土体再造，首先消除对植被恢复有影响的生存性限制因子。排土场土地重塑主要包括：基底构筑、主体构筑、平台构筑、边坡构筑、水土保持与排洪渠构筑等工艺。

排土场基底构筑的核心就是要形成“疏水型”的基底，确保基底地面排水通畅。排土场主体构筑指从排土场基底构筑完毕后至排土场表层覆土前的空间范围，实行扇形推进、多点同时排弃的方法。排土场基底构筑和主体构筑过程是地貌重塑过程，而排土场平台构筑过程实际上就是人工进行土体再造，形成复垦种植层的过程。边坡构筑要根据实际情况设计表层覆土厚度，因为当地在雨季，特别是暴雨期，发生“剥皮”的几率大，如按常规就有不妥。暴雨的集中，使矿区还需设置必要的排洪渠系，以确保排土场的稳定和安全。

(2) 土壤重构

土壤重构是指在土地重塑的基础上，再造一层人工的土体，并通过各种农艺措施，使土壤的耕性不断改善，肥力不断提高的过程。土壤重构的实质是通过人为措施加速岩石风化和生土熟化的过程，从而使土壤的颗粒、物理、化学、生物等性状逐渐趋于正常化。

(3) 植被重建

平朔安太堡矿区地处干旱半干旱黄土高原脆弱环境，植被重建存在若干不利因素。根据立地条件、矿区发展的时空顺序，合理配置草、灌、乔，并实施了三种配置模式：

1) 平台植被配置模式。根据平台的地理位置和使用方向可分为永久性林牧用地平台和过渡性林牧用地平台。永久性林牧用地平台主要分布在公路、铁路、工业广场较近的部位，它们作为永久性林牧用地平台，对矿区环境美化，防止粉尘污染和防风固沙等方面起着重要作用。其配置模式有：刺槐纯林、杨树纯林、沙棘纯林、旱柳纯林、刺槐×杨树混交林、刺槐×沙柳混交林、油松×刺槐混交林、刺槐×旱柳混交林、杨树×沙

棘混交林等。过渡性林牧用地平台配置模式主要分布于内排的最终平台，最终的土地利用方向为耕地，但由于内排土场非均匀沉降严重，土壤肥力缺乏，通过种植林草来改良，当土壤肥力提高后，当地对耕地有需求时，除保留30%的林草用地外，其余70%可转为耕地，其植被配置模式有：林网新疆杨×网间豆科牧草、林网刺槐×网间药用植物、林网合作杨×网间柠条林、林网小黑杨×网间沙棘林等。

2) 边坡植被配置模式。在排土场复垦和生态重建中最为关注、技术难度最大的是边坡植被工程。根据环境保护，水土保持和土地复垦的要求，边坡的利用方向是永久性的林草用地。边坡上的黄土不宜铺的过厚，一般以 20~30cm 左右为宜，促使植株根系纵深向向石砾层伸展，其上的植物应以直播为主，栽植为辅。在边坡的底部即坡麓部分修建深宽各 50cm 的排水渠，在水渠两边各间植两行刺槐和杨树，其株行距为 2m×3m。边坡植被配置模式有：刺槐×禾本科豆科牧草、沙棘×豆科禾本科牧草、柠条×豆科禾本科牧草、油松×柠条、杜松×沙棘等。

3) 排土场周边植被配置模式。排土场周边植被包括其周边防护林带，矿区铁路、公路沿线两侧闲置地的绿化，调度室、破碎站、选煤厂和储煤库等场地周边闲置地绿化，沉淀池周边的绿化。这类植被配置是将其绿化美化功能与水土保持结合起来。排土场周边防护林带采用新疆杨或合作杨与刺槐间栽，中间套种沙棘或沙枣，种植带宽度可达 20~30m，其他场房与道路两边采用旱柳与云杉、新疆杨与油松、沙棘与油松等方式配置，其行间种植蜀葵、波斯菊、石竹等多年生花卉植物。

安太堡矿区土地复垦以来，已产生了很大的生态效益、经济效益和社会效益。地面植被覆盖率提高，生物多样性增加，水保作用增强，土壤肥力提高，彻底改变了原来的荒山秃岭景观。同时，经过土地重塑、土壤重构、植被恢复，既保证了“耕地总量动态平衡”，又重建了比原生态系统更好的生态系统。改善了矿山与地方政府、矿山与农民的关系，增加了经济收入和社会的稳定性。

4. 王家沟流域水土流失综合治理

王家沟流域位于吕梁山脉以西，地处晋西黄土丘陵沟壑区，为黄河一级支流——三川河流域的一条支沟。经过山西省水土保持研究所和山西大学黄土高原研究所等有关单位多年来的试验研究和综合治理，王家沟流域水土流失得到有效的控制，生态环境得到明显改善，整个流域的经济发展水平有了显著提高。综观其治理实践，从开始就按照以流域为单元，工程、生物、耕作三大措施一齐上，沟坡兼治，综合治理。

早在 20 世纪 50 年代，王家沟流域就被选为晋西水土保持综合治理的示范点。中国科学院黄河流域综合考察队对该流域进行了综合考察，并制订出了治理规划。主要治理措施有坡耕地培地埂、陡坡地营造刺槐林、种植优良牧草草木栖、垄作区田耕及打坝淤地、修谷坊等。后又修建了水平梯田，抗旱丰产沟。在治理措施的组合配置上，梁峁顶和梁峁坡修梯田、种草或营造经济林，沟坡营造乔木和灌木林，沟底布设淤地坝，符合黄土丘陵沟壑区的水土流失自然规律，做到了节节截流，层层拦蓄。

1995 年以来，全流域对现有的人工梯田进行有计划的拓宽改造和维修，使田面平整，埂坎坚固。如图 12-7 所示的就是经济生物埂坡式梯田，和 50~60 年代的坡式梯田基本相似，只是在埂上加栽红枣、花椒、核桃等易生长、耐干旱、少投入的经济林，埂

外坡种植苜蓿、沙打旺等耐干旱瘠薄、有饲用价值的牧草。埂上部有聚肥、聚水、聚土的“三聚带”，埂下部有表土集中，淤泥蓄水的“抗旱丰产沟”。其作用是截短坡长，降低坡差高度，并通过逐年加高，定向耕作和坡面自然冲刷，使陡地逐年变缓变平，是一项投资少、见效快、经济效益高，粮食产量增加及保水、保土效益显著的坡耕地治理新模式工程。在注重坡面治理的同时，亦应加强沟道工程建设，尤其是配套的控制性骨干工程。在干沟修筑了控制性骨干坝 2 座，并对支沟淤地坝重点加高培厚，设置了竖井涵洞及溢洪道，保障了支沟淤地坝的安全。

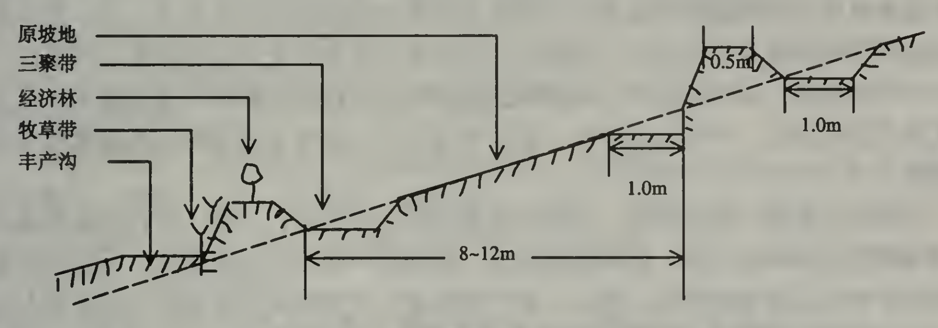


图 12-7　经济生物埂坡式梯田剖面图

此外，对 25°以下的坡地，栽培经济作物或经济价值高的粮食作物，选用抗旱良种，推行抗旱丰产沟、山地水平沟等有效的农业耕作措施。坡度小、交通比较方便的坡地，修成高标准水平梯田。大于 25°以上的坡地，实行退耕造林种草。对现有的已形成小老树的刺槐林进行更新改造，引进抗旱、耐寒、耐瘠的油松、侧柏等针叶树，实行乔灌混交和针阔混交。原有的造林工程加固维修和扩充，郁闭度低的灌木林进行补植，沟沿广种柠条等抗旱性极强的灌木树种，以减少重力侵蚀。对现有的经济林进行合理的经营管理，树周围修筑水保工程，空间种植绿肥牧草，树体实行科学修剪，加强病害和虫害的防治，提高果品产量。对已经老化的果园更新复壮，并引进结果早、产量高、易管理的果树类型，如山楂等，取得了较好的效果。

第十三章　灾害生态学

有史以来，世界各地都不同程度地发生过这种或那种或多种自然灾害，可以说人类正面临着自然灾害的威胁和挑战。自然灾害的发生往往易形成灾害链，即一系列灾害因成因的关联而相继发生的现象。如洪灾区多出现一系列的虫灾病害和瘟疫的流行；大旱之年，禾木枯焦，这本是灾情，而这时的温度既适宜蝗虫的繁殖而造成蝗灾，又易引起火灾等灾害的发生。灾害链的存在，在某种意义上，加重了灾害的危害程度和对它的治理难度。

人类与灾害是一对立关系，人类与灾害之间互不相容，人类一直在为避免或减少损失而与灾害作不懈的斗争，但人类的活动，特别是一些不合理的活动，不仅没有减少灾害的发生和灾害造成的损失，相反，有时却促进了灾害的发生和发展，如由于人口的增加，加大了地球的负载，同时，加重了大气污染，从而导致酸雨、水土流失、淡水短缺等，而且有害气体的增多导致臭氧层的耗竭，对人类的生存环境造成很大威胁。因此，研究灾害与人类活动的生态关系尤为重要。

第一节　灾害生态学概论

一、灾害生态学概述

灾害生态学是一门灾害学与生态学相互渗透、相互交叉的边缘学科，同时，它又是灾害学和生态学两大学科的继续和发展，是一门目的更明确、更直接的应用性的边缘学科。从人类大的生态环境出发，更有效地认识灾害产生的原因及灾害发展和可能造成的危害，从而为减小或避免灾害的发生和可能造成的损害，采取相应的措施，最终达到人类与环境的协调发展。

（一）灾害生态学与灾害学的关系

在某种意义上，灾害学是灾害生态学的基础，是灾害生态学发展的前提。

在日常生活中，人们普遍能领悟或感受到“灾害”的存在和“灾害”的威胁。早在2000多年前的《老子》一书中，就有“祸兮福所倚，福兮祸所伏”之句，其中的“祸”即灾难之义。其实，人们对“灾害”的理解则偏向于意外的事件给人类社会带来的额外的损失。“意外事件”即预料之外所发生的事件，有偶然发生的意思。因此，有人就将“灾害”定义为反常(意外)事件导致人类社会遭受的损害。但并非所有的意外事件都给人类社会造成意外损失，人类社会遭受的损害也并非全由意外事件所致。

在中国自古就有“天灾”和“人祸”之分。“天灾”即自然灾害，《左传·僖公十三年》称“天灾流行，国家代有”。“人祸”即人为的危害。“灾”在古代写作“菑”。原指自然发生的火灾，《左传·宣公十六年》中述有“凡火，人火为火，天火为灾”，后来逐渐泛指水、火、荒、旱等所造成的祸害。“祸”即灾害、灾难，《荀子·劝学》中有“福莫长于无祸”。在此基础上，一般将灾害按发生的起因分为“自然灾害”和“人为灾害”两种。

自然灾害是指在地球表层自然环境系统中，某一地区在某一时间内，由于某一个或某几个自然因素发生较大、较快的变化，当其变化强度超过一定的阈值时，给人类生命财产带来严重破坏或造成巨大损失的现象。广义的自然灾害，既包括由自然因素引起的灾害，又包括由于人类的活动所引起的灾害。而狭义的自然灾害则主要指由自然因素引起的突发性的自然灾变。

按不同的分类原则，自然灾害有不同的划分类型。一般根据自然要素的变异性来划分，即地质灾害：地震、火山、地裂等；地貌灾害：崩塌、滑坡、泥石流等；气象、气候灾害：干旱、洪涝、台风、冰雹、冻害、雪灾等；水文灾害：洪水、海潮等；生物灾害：虫害、病灾等；海洋灾害等。

人为灾害，也有人称之为人文灾害，或环境问题。主要是指由人类不合理的活动导致灾害过程和结果。

人为灾害据其形成的原因可分为三类，即：不合理的人为活动直接导致的灾害：如过度开垦、人为污染等，均因人类活动失调所致的；人口失控造成的灾害：地球资源的有限性和相对性，就决定了地球承载的人口数量的有限性，人口过快增长，超过了地球承载力，就形成人口灾害；人为自我致灾，即决策失误造成灾害的过程和结果：包括思维惰性负反馈过程、情态负反馈过程和出人的负反馈过程，特别是一些改造自然的重大工程的失误，如大型河流的水库、跨流域调水工程等。

在实施可持续发展的战略中，人类不是在发展的过程中完全排除灾害的干扰，而是应该采取客观的态度，正视灾害，将灾害控制在协调发展的总框架之中。

（二）灾害生态学与生态学的关系

生态学是研究有机体与其周围环境——包括非生物环境与生物环境相互关系的科学，它也是灾害生态学的理论基础。生态学的概念极为庞杂，它的形成和发展经历了漫长的四个历史过程，而且其起源又是多元的(详见第二章)。

随着工业化的高速发展和人口的大量增长，带来了许多全球性的问题，如人口问题、环境问题、资源问题等，这些问题涉及人类的生死存亡，而且这些问题的解决，都要以生态学原理为基础，从而引起了社会对生态学的广泛关注。研究领域也从原来的生物学渗透到其他多个学科，如地学、灾害学、经济学及农、林、牧、渔、医药卫生、环境保护、建筑、工程等，形成一系列的交叉学科，诸如农业生态学、森林生态学、草地生态学、环境生态学、环境工程生态学、经济生态学、地理生态学及灾害生态学等。从而使生态学得到了空前的发展，特别是应用生态学的迅速发展，使生态学不再仅仅是一

门解释自然的科学，而成为改造自然的武器。

灾害的发生，一般是生态系统发生变化，生态过程发生变化，这或多或少都与人类的活动有关，有的甚至主要是由于人类不合理的活动所致，如温室效应。因此，从人文角度出发，以生态学为理论基础，对灾害发生的原因及其危害进行全面的分析和研究，明确人类与环境的生态关系，协调人类活动与环境的关系，减少或避免灾害的发生，并对灾害进行监控和生态治理，降低灾害造成的损失。

（三）灾害生态学与其他学科的关系

灾害生态学除与灾害学与生态学有着紧密的联系外，还与其他的一些相关学科，如环境学、地理学、农学、林学、工程学、生物学、化学等许多学科有着不可忽略的关系。灾害生态学的发展离不开这些学科已经形成的理论的支持。

二、灾害生态学研究的内容

对灾害形成的研究，古已有之，而且人们对灾害的认识水平是随着时代的进步、经验的积累和技术的发展而不断提高的，并且在此基础上不断地改进减灾的措施。例如对洪灾的认识，早在几千年以前人们就认识到洪灾是由于暴雨或连日阴雨、江湖宣泄不畅而造成的，即所谓的“洪水横流，泛滥于天下”（《孟子·滕文公上》），“然河菑衍溢，害中国也尤甚”（《史记·河渠书》）。但是在很长时期内，在防治洪灾的活动中几乎没有真正能把握住洪灾的本质，人类对付洪灾最早的办法是避，选择在洪灾泛滥所不能及的洞穴中或江湖边沿的高台地上作为居住地。在 4000 多年前的尧、舜、禹时代，由鲧继承共工氏“壅防百川，堕高堙庳”的传统，推行“鲧作城”“堙洪水”的办法来堵挡洪水的侵袭。结果是九年没有成功。紧接着是鲧的儿子禹执疏导的主张进行治水，“高高下下，疏川导滞，钟水丰物”（《国语·周语下》），即把河道加宽、加深，疏导归下，并辅以湖泊蓄水，以分判水陆，使“水由地中行”（《孟子·滕文公下》）。

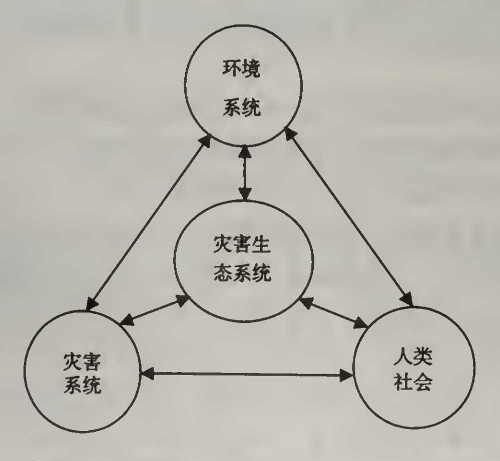


图 13-1　灾害生态系统构成（延军平　1980）

随着人类文明的不断进步，特别是生态学的出现和发展，人们对灾害的认识也越来越深入。灾害并不仅仅是自然的变异所造成的，人类自身的活动在灾害的启动和发展中起到了重要作用。现在，人们已不再是被动地采取措施来加以整治，而是将灾害的发生原因与人类的活动结合起来考虑，从而能更全面地认识灾害的发生机理，利用生态学的原理，改善自己的生态环境。灾害生态学就是从生态体系的全局出发，研究灾害环境和人类相互关系的一门科学(图 13-1)。即研究各种灾害的发生及其带来的或可能带来的危害，灾害形成的机理以及如何阻止灾害的发生、发展或尽可能地减小灾害可能造成的损失，将灾害损失减少到最低限度。

灾害生态学的研究对象包括地震灾害、台风灾害、洪水灾害、干旱灾害、泥石流灾害、山洪灾害、虫灾病害、土地退化、厄尔尼诺现象、拉尼娜现象、海平面上升、地裂、地陷、龙卷风等等。但由于篇幅的局限，本章主要从台风、洪水、土地退化、干旱、泥石流等几个方面加以探讨。

三、灾害生态学的展望

灾害生态学是一门新兴的边缘学科，它对灾害的发生发展的原因进行了全面、系统地剖析，分析灾害发生的原因则将自然界与人类的活动紧密地结合起来，从人类自身出发寻求自然变异导致灾害与人类活动的关系，为人类的可持性发展提供了理论上的根据。

由此可见，灾害生态学是一门不断发展着的科学，它将随着人类社会的进步和对灾害的认识的不断深入，灾害生态学将会有更大的发展空间。

第二节　洪 涝 灾 害

一、洪水灾害的概述

洪水灾害是一种常见的自然灾害，它是由于特大的地表径流河槽不能容纳，洼地积水不能及时排出，或海面突然上升海水侵入而泛滥成灾。

洪水导致的危害是相当大的，它涉及面广，损失严重。地球陆地的许多地区都存在着不同类型或不同成因的洪水灾害。一般地，洪水灾害主要集中在中低纬度地区，特别是南亚、东南亚和东亚，受季风和热带风暴的强烈影响，暴雨洪水和风暴潮危害特别严重。中国、印度、孟加拉、日本等国经常受到洪水的袭击。洪水造成的损失，不论是在世界范围内，还是在我国，是各种自然灾害中损失最大的一种。据统计，在全球灾害损失中，仅洪水造成的损失就占 40%(张家诚　1989)。在我国自公元前 206 年至公元 1949 年期间，共发生较大水灾 1092 次，主要集中于东部。在我国东部地区有近 73. 8 万 km^2 的国土面积处于江河洪水水位以下，有约占全国 40%的人口、35%的耕地、60%的工农业总产值受洪水的严重威胁。建国后的 1950~1997 年间，洪涝受灾面积年均 $910.6\times10^4hm^2$，直接经济损失年均上百亿元。

洪水可分为河流洪水、湖泊洪水和风暴洪水等。其中河流洪水的主要特点是峰高量

大，持续时间长，灾害波及范围广。河流洪水又可分为暴雨洪水、山洪、融雪洪水、冰凌洪水和溃坝洪水五种类型。由于山洪的发生具有一定的特殊地理位置，同时，其危害又极其普遍，一直受到人们的重视。所谓山洪，即发生在山区溪沟中的快速强大的地表径流现象(徐在庸 1981)。它是山地灾害中的一种，它是发生在山区的洪水，但又不同于一般发生在山区河流的洪水，而是特指发生在山区流域面积较小的沟或周期性流水的荒溪中，历时较短，暴涨暴落的地表径流。一般山洪的流域面积小于 50 km^2，历时几个小时到十几个小时，很少达到 1 天的。暴雨洪水是最常见的威胁最大的洪水，由于它是由强烈的降雨而形成的，又简称为雨洪。在我国受暴雨威胁的地区主要分布在长江、黄河、淮河、海河、珠江、松花江、辽河等七大江河下游和东南沿海地区(表 13-1)。

我国又是一个多暴雨的国家，暴雨洪水是我国江河洪水的主要类型。其类型可分为三种：

① 由短历时(几小时或十几小时)大暴雨所形成的局部的大洪水，其暴雨笼罩的面积较小，约有几十平方公里至几千平方公里；

② 由中等历时的一次暴雨过程所形成的区域性大洪水，暴雨可持续在 3~7 天，暴雨笼罩面积可达 10 万~20 万 km^2，可使一个地区或几条大的河流同时发生大洪水；

③ 由长时间大范围的连续阴雨，并有多个地区多次暴雨组合而成的阴雨性洪水，其降雨时间可达 12 个月，造成几个流域同时发生大洪水。

表 13-1 我国七大江河洪水年表

流域	年份							
	1911~1920	1921~1930	1931~1940	1941~1950	1951~1960	1961~1970	1971~1980	1981~1990
黄河			1933, 1935, 1938		1958			1981
淮河		1921	1931		1954		1975	
海河	1917	1924	1939		1956	1963		
长江			1931, 1935		1954			1981, 1983
珠江	1915			1947			1976	
松花江			1932		1957, 1960	1969		1985
辽河					1951, 1953, 1960			1985, 1986
合计	2	2	8	1	11	2	2	6

引自中国自然灾害研究委员会 1993

二、洪水的危害

洪水灾害是相当严重的，造成的经济损失极为巨大，同时也给人们的身心健康带来伤害。

① 对农业的发展造成巨大的影响。在暴雨洪水中，大片农田被淹、被冲，在洪水过后，水土流失严重，土壤的肥力下降。如 1981 年四川省的洪涝灾害，据统计，农作物受害面积达 1756 万多亩，其中基本无收的有 4596 万亩，冲毁 147. 5 万多亩，冲走粮食达 2.5 亿公斤，冲走淹死牲畜约 14. 8 万多头。山洪的频繁发生，破坏了山地的表层结构，增加了土壤的侵蚀量，加剧了水土流失，使山区的生态环境日益恶化，而日益恶

化的生态环境反过来又加剧山地灾害的发生频率和受灾的程度，造成严重的恶性循环。

② 冲毁公共建筑设施，造成巨大的人身财产损失。如 1963 年的海河流域的水灾，水利工程破坏严重，刘家台、东川口、马河、佐村、乱木等 5 座中型水库因漫坝或超过设计标准而失事，库容 1 万 m^3 以上的小型水库垮坝失事的有 330 座。62%的灌溉工程、90%的平原排涝工程被冲毁或淤平。京广、石太、石德等干线铁路及支线铁路相继中断，破坏总长 116km。

③ 可能诱发其他灾害的发生，如泥石流、崩塌、瘟疫、传染病等灾害。

三、洪水产生的原因

洪水的原因是多样的，主要可划分为自然和人为两个方面的原因。

(一) 自 然 因 素

首先是洪水的水源，如暴雨、海啸、冰雪消融、湖水溃决、水库溃坝等。其次是特殊的地貌条件，它不仅影响降雨量，而且地面的高程、坡度切割程度等都直接影响地面水流的汇流。地势愈陡，切割愈强，地表径流和河网的汇流速度就愈快，汇流时间就愈短，地面径流损失就越小。若径流所经过的是低平的汇水盆地，因地势低平，河谷开阔，河道曲折，河床淤高，洪水宣泄困难，洪峰受阻，则经常出现洪水泛滥成灾。再次是土壤与基岩岩性及地表的植被覆盖情况等，这都影响洪灾的发生和发展及其规模大小。如在我国，洪涝灾害主要发生在东部平原及山间河谷盆地，在这些地区泥沙是主要的地貌塑造介质，其通过形成特殊的地貌条件对洪涝灾害的发生起作用。

(二) 人 为 因 素

在洪水灾害形成过程中，人为因素占有重要地位。尽管人类一直在苦苦寻找根治洪灾的良策，并且人类已经拥有了强大的改造自然的能力，但是洪灾却有增无减，在发展中国家尤其严重。从总体而言，近几十年降水量呈下降的趋势，但洪灾的影响并未减弱，以我国为例，我国自 1951~1989 年中的灾害受灾面积呈上升的趋势(图 13-2)，虽然这一期间的年降雨量总的呈下降趋势(图 13-3)。由此可见，在水灾形成的原因中，人类活动是不可忽略的因素。

1) 乱砍滥伐，毁林开荒，破坏了地表的植被。没有森林的覆盖，一方面是大量的雨水无法被蓄存，使洪峰猛烈，增加了洪水泛滥成灾的频率；另一方面加重了水土流失，使大量的泥沙被冲走，又进一步淤积在河道中或水库中，使河道抬高、库容减少，降低了调洪和排洪能力，加大了受灾害面积和程度。

2) 城市的“热岛效应”，使城区的暴雨频率与强度提高，加大了洪水成灾因素。同时由于城市生活污水或工业污水的净化不力，也加重了洪涝成灾及受灾的程度。

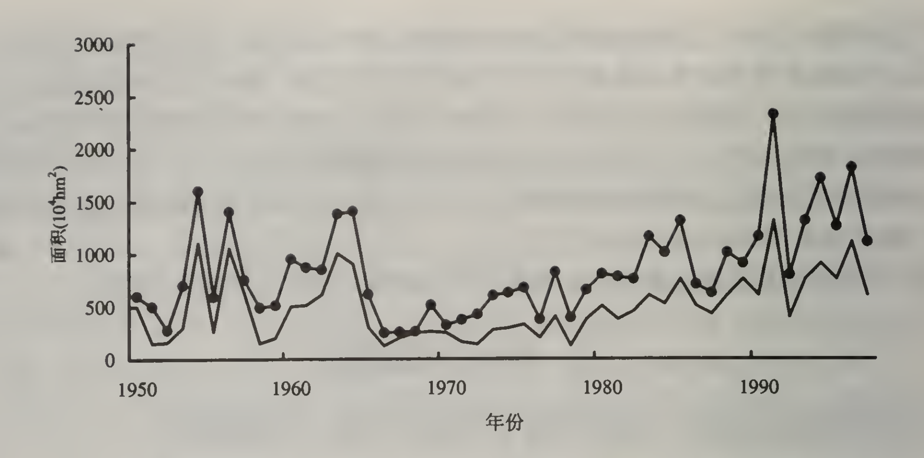


图 13-2　我国水灾受灾面积和成灾面积变化(据师长兴等　2000)

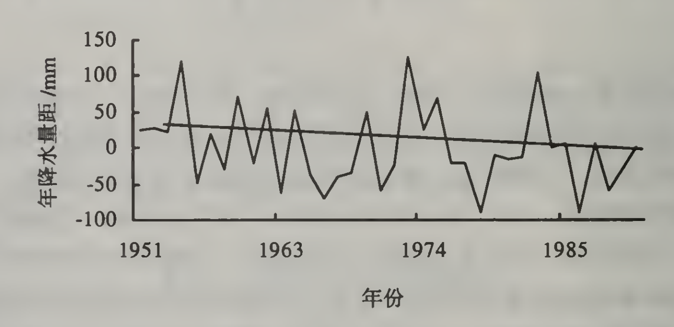


图 13-3　中国 1951~1989 年年降水量距平曲线(据赵宗慈　1996)

3) 围湖造田，湖泊对削减江河洪峰起着重要作用。近 30 年来，人们为了眼前的利益，急功近利，仅湖南、湖北、江西、安徽、江苏 5 省围垦湖泊的面积就在 12 000 km² 以上，比现在的 4 个洞庭湖还要大得多，使湖面急剧减少。素有千湖之称的湖北，湖泊面积损失 70%；湖南洞庭湖已围垦掉 1500 km²，现在仅剩下 2840 km² 的湖面。虽然，围湖造田在一定意义上有所得，但其造成的抗洪甚至造成的水灾的损失是值得深思的。

4) 在河道内、河滩上盲目发展，也为洪灾的形成创造了有利条件。如在河道内种庄稼、建工厂等。1985 年的辽河水灾，洪峰流量不足 2000m³/s，河道允许泄量为 5000 m³/s，但允许流通的泄洪量只占 40%，究其原因主要是在河滩地盲目建设所致。这次洪灾加上沥涝、大风、冰雹等灾害，损失严重。受灾耕地达 160 万 hm²，占当地耕地面积的 40%。损失粮食 500 万 t。

四、洪水灾害的防治措施

对于洪水灾害的防治，要从治标和治本的角度同时考虑，加大抗洪工程的投资力度，提高河道、水库、城市等的抗洪标准；做好洪水的预防预报工作，以防为主，从防灾的基础出发，做好与防洪、抗洪有关的环境治理和保护工作。更为重要的是要改善生态环境，协调人与环境的关系，减少或避免洪灾的发生。

① 退耕还林还草，植树造林、积极种草，迅速恢复植被，在山区加强种植牧草力度，同时要科学地进行放牧，如采取轮牧的放牧方式。我们知道没有覆盖的裸露的陡坡和荒山秃岭，其地表的径流量与水土流失的量要远远大于种有牧草的植被条件较好的山坡。而且，由于牧草生长快，能在较短时间内覆盖地面，防止雨滴直接冲击地表，并将径流分散成细小的水流，沿着草根渗入到土中，起到保持水土，固定土壤，延缓地表径流的流速的作用，对减小灾害有着重要意义。根据不同的流域、不同的位置，选择不同的树种。局部的生态环境得到改善，从而使区域生态系统趋于平衡。

因为森林对降雨量能进行一系列的再分配，以一定比率分配给林地的不同部位，如植物的枝叶树干能截留雨水，截留的量与植物的种类和覆盖度的高低有密切关系(表 13-2，表 13-3)。植被可以增加地面的粗糙度，枯枝落叶层、生草层可改变土壤的结构，同时其本身也有很高的持水性，据估算，1 万 hm^2 的森林所能蓄存的水量，相当于一座库容为 300 万 m^3 的水库。

表 13-2　植被覆盖度与初损雨量

植被覆盖度 /%	径流起始时间	初损雨量 /mm
48	3 分 40 秒	3. 67
90	12 分 34 秒	12. 50

引自曹忠杰等　2001

表 13-3　不同盖度产流产沙量

盖度 /%	雨强 /mm · min^{-1}	历时 /min	流量 /m^3 · km^{-2}	产沙量 /t · km^{-2}
90	2.0	30	1352.24	5.183
48	2.0	30	1564.40	7.890
90	1.0	30	944.24	2.772
48	1.0	30	1224.46	5.517

引自曹忠杰等　2001

② 加强城市的绿化工作，改善小范围的气候状况，如在现代城市建设中，将森林引入城市，让城市坐落森林之中，恢复人类与森林本来的和谐关系。如在莫斯科的东郊有 8 条绿色林带，构成莫斯科森林区，区内树木繁茂、绿草如茵；华沙周围已形成了 6 万多公顷的森林。这些森林不仅具有一定的美学价值，更为重要的是这些林地起到了净化、解毒、蓄存水分、改善区域小气候状况等功能。避免或减少城市的热岛效应所带来的不利影响，将洪水灾害可能造成的损失降到最低点。

③ 加强蓄洪区的土地使用管理工作。在一些地势低洼，内湖较多，水库较大的蓄洪区，逐年引导和帮助群众调整产业结构，以渔业和种植水生植物为主，农副业为辅，提高当地人民的经济收入；并严格控制人口的增长，严禁向分洪区移民，并鼓励外迁，将分蓄洪区人口引向安全地区，减少分蓄洪区的人口压力。对分蓄洪区的土地进行统一管理，提高耕作的机械化水平。保护分蓄洪区的树木，禁止乱砍滥伐。

④ 要加大退耕还湖、还河工作。在湖区开展渔业及其他一些相关的副业，一方面既可以增加当地农民的收入，同时也有利于防洪救灾。

⑤ 加强执法力度，依法管理河道、水库及防洪设施，做到有法可依，有法必依，执法必严，违法必究。

⑥ 加强宣传，提高人们对洪灾的深入认识。

⑦ 加强预测、预报工作，提高人工防灾、救灾能力。

第三节　泥石流与滑坡

泥石流、山洪和滑坡等都是山区所特有的灾害，又统称为山地灾害(唐邦兴 1994)。由于特殊的地质构造，我国已成为世界上山地灾害最为严重的国家之一。据调查，我国山地灾害遍及 25 个省、市、自治区的广大山区。我国泥石流的发生强度、规模及其造成的经济损失、人员伤亡等均居世界之前列。

一、泥　石　流

（一）泥石流概述

泥石流是含有大量固体物质(泥、沙、石)的洪流，流体容重一般在 $1.2\sim2.3 t/m^3$。它的流态和性质都很不稳定，随着固体物质在流体中的相对含量、岩性和颗粒物的大小、河床的形态和坡度等的变化而变化，在泥石流运动的过程中又随时间和地点的不同而改变。

泥石流的爆发具有突发性，运动速度快，能量巨大，破坏力极强，且具有一定的周期性。危害的方式多以淹没、淤埋、冲毁、堵塞、冲刷和溃决为主。

（二）泥石流的危害

泥石流的危害是指泥石流活动过程中对客观环境(包括各种设施、人民生命财产和资源环境)造成灾害和影响。

1. 对山地环境的影响

泥石流对孕育其发生发展的沟谷产生强烈的侵蚀，尤其是中上游段，一次大型的泥石流，可使沟谷下切 3~5m，有的可达 10m 以上(如古乡沟泥石流)，能把十万立方米，乃至数百万立方米固体物质冲出山谷，输送到堆积区或主河道。严重的泥石流活动区，土壤年侵蚀模数可达 2 万~3 万 m^3/km^2。由于泥石流强大的侵蚀作用，破坏沟源和两岸山体的稳定性，重力作用不断加剧，滑坡、崩塌不断发生，泥石流活动进一步发展。山地不断被蚕食和肢解，而支离破碎，沟谷纵横，滑坡成片，使昔日森林密闭、林木葱葱的青山绿水，演变成为荒山秃岭、恶水横流的荒芜的景象。

泥石流是一种饱含泥沙、石块的特殊洪流，具有固体物质含量高，大块石多，冲击破坏力强等特点。泥石流暴发冲出山口，进入宽缓的大河谷地，大量泥石流块停积而形

成堆积扇，特别是那些暴发频率高，一次冲出固体物质达百万立方米的特大泥石流，顷刻之间使河谷地形巨变，形成沙滩石海。在泥石流沟分布密集的河谷，一场大型或特大型黏性泥石流，以整体方式搬运固体物质进入大河，一举形成天然堆石坝堵塞河道、壅水成湖，随着水位升高，水流漫顶过坝，往往导致坝体溃决，形成特大溃决洪流，强烈地冲蚀河谷，所经之处一切荡然无存，迅猛地改变河床、河谷的形态，严重地影响水资源、土地资源的开发利用和环境保护。如西藏东南冰川泥石流，金沙江暴雨泥石流对河谷环境影响都是典型的事例。

泥石流进入大河除停积一部分泥沙、石块外，其余被水流挟带而下，使大河含沙量大大增高，常常由于河床淤高，使得水资源开发非常困难。最严重的小江河床，每年淤高形成大面积的沙石荒滩，致使河谷环境恶化。

2. 可引起其他灾害

泥石流活动可使山地环境退化，森林植被破坏，由此而引起一系列其他灾害。

1) 造成干旱、洪水灾害。由于泥石流地区失去了调节气候、涵养水源、调节洪水和保持水土的能力，一方面导致该地区气温变化加剧，风力增大，降水量减少，产生干旱灾害；另一方面一遇暴雨，易于形成强大暴雨径流，造成洪水灾害，而且地表水多流失，大大减少对地下水的补给，从而影响到枯水季节对河流的补给，使河流枯竭。

2) 加速土地退化。由于泥石流破坏耕地，使沙石满布，地表荒芜，甚至造成风沙灾害，致使土地退化加剧。

3) 环境污染加重。由于地表缺乏森林植被而失去净化大气的能力，致使二氧化碳等有害气体不断积累，尘埃增高，加重环境污染。

（三）泥石流产生的原因

1) 自然因素。地质条件、地貌条件和水源条件是泥石流形成的三个基本的条件。其中地貌条件是形成泥石流的内因和必要条件，它制约着泥石流的形成和运动，影响着泥石流的规模和特性，并且在泥石流的活动过程中对其有着再塑造的作用。

2) 人为因素。随着经济的发展，人们对山区资源的开发越来越快，而对这些开发活动缺乏全面的规划和有效统筹管理，使森林生态系统受到干扰和破坏。如我国岷江上游五县(汶川、黑水、理县、茂县、松潘)，1949 年森林覆盖率为 30%，70 年代末降至 18.8%，1981 年就有 129 条沟暴发泥石流，黑水知木林区的小黑水与毛尔盖河下游许多沟谷发生暴雨泥石流，其中多数与流域内的过度砍伐而导致森林生态系统破坏有直接关系。泥石流的形成与人类的不合理的经济活动有着密切的关系：① 不合理的森林采伐方式，使森林生态系统破坏以致毁灭，而导致灾害。据测定，如果大面积皆伐加串坡集材，径流含沙量可达 1.3g/L。如四川的西北林业局伐区，于 1978 年在 45°以上坡地禁伐区实行皆伐，1979 年的雨季就暴发了泥石流。② 毁林开荒、刀耕火种、陡坡垦植的落后的耕作方式，破坏了森林生态系统。加之在修筑公路时，开山挖石，乱炸乱堆；修环山渠道时弃渣不当，防渗措施差或根本无防渗措施，则为泥石流的形成创造了条件。一

旦遇到暴雨，极易形成泥石流。③ 公路与铁路修建与运营过程中，往往只为一时取土方便，而忽视了路的上下边坡山体，造成山坡失稳，引起公路铁路的上下滑坡和崩塌，导致泥石流的发生。

（四）泥石流的防预措施

泥石流的防治应以防为主，因为泥石流一旦形成，就要造成损失，并需耗费大量的人力物力加以治理。首先是保护自然植被，植树种草，扩大森林草地的覆盖。其次，坚持与拦排相结合，以拦为主。在泥石流形成流通堆积区内，采取相应的工程措施，如蓄水、引水工程，拦挡、支护工程，排导、引渡工程，停淤工程及改土护坡工程等进行治理，以控制泥石流的发生和危害。下面主要是生态治理措施：

第一，加强森林、灌丛、草地植被的保护和建设，科学合理配置，充分发挥其滞留降水，保持水土，调节径流等功能，以达到预防和制止泥石流发生或减小泥石流规模，减轻其危害的目的。在水汇集的地方和泥石流易形成的地区至分水岭范围内的坡面上发展水源涵养林，树种主要选择高大的乔木为主。并在可能的条件下，尽可能地营造针阔叶混交林，保留林下的枯枝落叶，使其真正起到削弱水动力的作用(表 13-4)。

表 13-4　植被对降水的滞留作用表

降水 /mm	滞留量 /%			
	枞林	松林	水青冈林	草被和草场
>20	24	8	10	21
20~15	31	25	13	14~25
15~10	44	23	19	
10~5	57	38	29	45
<5	71	49	28	42~100

引自唐邦兴等　1994

在一些立地条件恶劣的地区采取容易成活的先锋树种，如马尾松、枫树、山杨、白桦、扁桃、柳、密油籽、马桑等。并根据沟头、沟坡、沟缘等不同地区选择不同的树种。如在堤防的两侧，在沟床陡峻并以冲刷为主的地段，可在堤防的内侧、堤脚，种植数行乔木树种，一般不少于 3 行，沿堤栽种，株距为 2~3m，呈“丁”字形分布。这就对保护堤防，增强堤坝抗御泥石流的能力，降低泥石流对河堤的破坏作用。

在对泥石流的防治中，同时加强对林业的综合利用，使森林能充分发挥其经济效益、社会效益、生态效益和防护效益。

第二， 通过改良农作物的种植方式，改善耕作条件，调整产业结构等措施，达到减轻水土流失，遏制泥石流发生的目的。如在易引起崩塌、滑坡活动的山坡上将水田改为旱地；陡坡农田则应退耕还林；实行农业水保耕作技术，变坡耕地为水平梯田，改顺坡耕作为等高耕作等。

第三， 加强对山地牧区的放牧指导和管理。乱牧、滥牧，常常使山荒林毁，山区的生态环境退化。应在牧区以既发展牧业而又不危害林草业发展为原则。采取一些有效

措施，如在幼林区及新造林地禁止放牧；建立固定的牧场并改善草场；有计划地发展畜牧业；在地势较为平缓的地区，进行林、草混交种植，培植优良牧草，提高产量，杜绝乱牧。

二、滑　　坡

(一) 滑 坡 概 述

滑坡是指构成斜坡的岩体在重力的作用之下失稳，沿着坡体内部的一个(或几个)软弱面(带)发生剪切而产生的整体性下滑的现象，它是山区最常见的自然灾害之一，也是导致泥石流的重要因素之一。

滑坡的分布极其广泛，从全球的水平地带性分布来看，热带、温带、寒带都有滑坡的发生。在我国，滑坡的分布也极广，各省均有分布，以大兴安岭—鄂西山地—云贵高原东缘为界，东部滑坡分布较稀；西部较密。以大兴安岭—张家口—榆林—兰州—昌都一线为界，东南部滑坡较为密集；西部较为稀疏。两线之间滑坡较为密集。

我国是一个滑坡灾害多发的国家，据记载，1943 年 1 月 3 日，黄河上游龙羊峡发生一高速剧冲性滑坡，埋没了上、下查纳村，死亡 213 人；1965 年 11 月 22 日，云南省禄劝县发生崩塌性滑坡，埋没了 4 个村庄，死亡 440 多人，毁地 1000 多亩。1980 年、1985 年、1988 年、1992 年等都发生了重大的滑坡事件，造成巨大的经济损失。

(二) 造成滑坡灾害的原因

滑坡形成的环境条件，一直是滑坡学研究的重要方面。引起滑坡的原因可归纳为内部条件和外部条件。内部条件包括地层岩性、坡体结构、有效临空面；外部条件包括地下水、地表水、振动(地震、机振、爆破作业)、降水(含降雪)、加载、坡脚淘蚀或开挖及其他(唐邦兴等　1994)。发生滑坡的内部条件是属于斜坡体本身具备的有利于滑坡发生的地质、地貌条件，是滑坡发生的内因和根据的体现，是发生滑坡的必要条件。外部条件是各种作用在斜坡坡体上的促使内部条件发挥作用，导致斜坡坡体发生滑动的外界因素，它们是发生滑坡的外因的体现，是发生滑坡的充分条件(补充条件、触发条件、诱发条件)。

人为因素是诱发滑坡的主要原因，如过度开采地下水、山区的开采活动等。其中人为的工程活动是引发滑坡最为积极的因素。常见的盲目工程活动有大药量爆破作业、斜坡开挖过陡过高、开挖斜坡时盲目地从坡脚开挖或全断面开挖、生产生活用水渗入坡体、坡内开挖时预留矿柱过小甚至不留保安矿柱、岸边丁坝设置不当致使河流主流线直冲对岸、护岸工程质量低劣等。

此外，人类的乱砍滥伐，破坏植被也加剧了滑坡灾害，因为良好的植被对减少滑坡危害起到限制作用。粗大的植物树干能够减弱滑坡运动的速度，缩短运动距离。

（三）滑坡的生态防治措施

滑坡灾害并非不能预防的，所谓的“防”则是当人们已认识到有可能发生滑坡的情况下，想办法在事前采取措施减少其下滑因素，增加其抗滑能力，以延缓或避开其危害；对稳定的斜坡或老滑坡，不实施有损于斜坡的人为活动。运用生态学的原则，改善山地的环境条件，减少滑坡产生的诱发因素，从根本上消除滑坡诱导因素。① 加大宣传，普及滑坡有关的知识，针对不同类型的人员举办不同类型的学习培训，推动全民参与防灾工作，加强人们的环境保护意识。② 制定封山育林区，在区内种植适合当地特点的树种，并在区内禁止不合理的人类活动。③ 退耕还林、停用水渠，修建山坡截留沟。

第四节 干　　旱

一、干旱的概述

干旱是因长期无降水或降水异常偏少而造成空气干燥、土壤水分缺乏的一种气象现象。干旱在气象学上有两种含义，一为气候学意义的干旱，是指某些地区，长期以来就一直降水少，人们称这类气候为干旱气候或半干旱气候。另一为天气学意义的干旱，是指一些地区，由于某些原因发生天气异常，在某一时期出现降水比多年平均值大为偏少的情况。若这种情况比较严重时，将导致该地区的经济活动(尤其农业生产)和人类生活受到危害，因此就形成了旱灾。所以我们认为干旱灾害是在特定的地域因长期无雨或少雨，气温高、湿度小，土壤的水分不能满足作物的需要，使作物的正常生长受到抑制，甚至枯死，造成减产或绝收的自然现象。

干旱是一个世界性的问题。全世界的干旱、半干旱地区分别占全球陆地面积的 24% 和 10.9%，遍布 50 个国家和地区。干旱灾害则时有发生，给人民生命财产和经济发展造成了极大的破坏。如 1968 年以后持续十多年的非洲大干旱，致使数十万人死亡；1982~1983 年，地处南半球的澳大利亚发生了一次严重的干旱，经济损失高达 20 亿澳元；美国西部于 1977 年发生了严重的干旱；1988 年北美发生了大范围的干旱，使美国的粮食产量减少 27%。

我国是大陆性气候，逐年之间季风的不稳定造成了我国大范围干旱的频繁发生。在我国历史上，据不完全统计，从公元前 206~公元 1949 年的 2155 年间，我国发生过的较大规模的旱灾不下 1056 次(国家科学技术委员会　1990)，平均每两年一次。尤其是占全国国土面积一半的西北干旱半干旱地区，干旱灾害已成为发展农牧业生产的主要限制因素，如我国陕北地区，干旱的频率很高，严重影响着当地经济的发展和人民生活水平的提高。即使是东部季风湿润地区，也常常出现季节性干旱，造成粮食产量不稳定。1959~1961 年的连续干旱和 1972 年、1978 年、1986 年、1988 年的大范围干旱，都造成我国农业的大幅度减产，因此干旱是严重威胁我国经济和社会生活的一大制约因素。

二、干旱的危害

干旱的危害是较为深远的，主要表现在以下几个方面：

1) 干旱是土地沙漠化的主要引导因素。如非洲的撒哈拉大沙漠地区，从 1968 年开始一直持续到 1984 年的旱灾，使这个地区的沙漠每年南移 5 公里。在中国的第四纪晚更新世距今 1.8 万~2.2 万年间的盛干燥期，宁夏中北部大部分地区为草原化荒漠和沙漠，风沙活动普遍而强烈。

2) 干旱易导致病虫害。干旱给疾病漫延和虫害的发生提供了有利条件，特别是蝗灾。公元 1483~1485 年(天历元年到至顺二年)，大旱，蝗、飞蝗遍及河北、河南、内蒙古、山西、陕西、山东、安徽、湖北等省区。夏麦枯槁，谷砂入种，流民十数万，自嵩、汝至淮南，死者枕藉，饿死者数千人，饥者 27 400 余人。这是我国历史上典型的大旱灾荒的例子之一。又如公元 1689~1692 年(清康熙二十八至三十一年)辽宁、河北、河南、山西、山东、陕西、甘肃大旱，河川涸竭，麦尽枯，飞蝗遍地，食苗至根。旧地如扫，饥民流徙，继之是瘟疫横流。

3) 干旱易引起火灾。由于干旱，大气的湿度很低，植被干枯，燃点温度降低，在有人为或自然火种时，则常常发生火灾。如对甘肃省林火的研究表明，96%的林火发生在相对湿度低于 40%的时候，而湿度大于 70%时则没有林火的发生。

4) 干旱是导致土地退化的重要原因之一。干旱时植物枯萎，土壤表面直接裸露，中午地表高温，夜间低温，土壤中微生物受到影响发生变化。土壤显著干旱加上土温的剧变，使有利于腐殖质分解和维持土壤团粒结构的微生物活动急剧减少，土壤结构破坏。如遇大雨，那些裸露地面、结构变坏的表土很容易被大雨冲蚀，形成强烈的水土流失；如遇大风，则又会形成强烈的风蚀。

5) 干旱是引起灾荒的重要因素。在我国公元 1634~1643 年(明崇祯七至十六年)，发生了近 500 年间持续时间最长、受灾范围最广的旱灾；其旱灾的核心地带是陕北、山西、河南，在最盛时波及至山东、河北、内蒙古、安徽、江苏、浙江、湖南、湖北、贵州、四川、甘肃，几近大半个中国都陷人苦旱之中：黄河枯竭，洛水不足一尺，川竭井枯。赤地千里，树皮蒿叶，可食用的全被吃光，到处都有饿死人的事。非洲仅在 1982~1984 年间因饥荒而死的人就有约 200 万人。

三、干旱的原因

造成干旱的自然因素主要是降水与蒸发。其中降水与干旱的关系又特别密切，主要表现在以下几个方面：一是全年降水总量的地理分布不均，降水较少的干旱、半干旱地区发生的几率大，如在我国华北的一些地区“十年就有九年旱”；二是降水的年内季节分配不很均匀，干湿季节明显，在降水较少的季节干旱易发生；三是降水的年际变化大，在降水量少的年份容易形成干旱。蒸发的多少也影响着干旱的发生，在降水一定的情况下，蒸发量越大，土壤水分损失越多，越容易引起干旱。

人为因素是影响干旱灾害发生和造成损失程度的重要因素之一。随着社会的不断发展，人口的不断增加，人类对土地资源的不合理利用加剧，使大量植被被破坏，大片森

林被砍伐，造成局部生态系统破坏，使其调节气候的能力减弱，从而加剧了干旱的发生(图 13-4)。

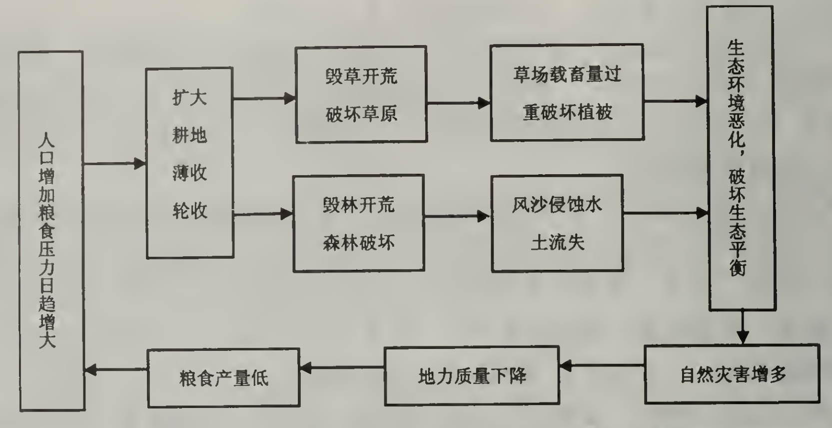


图 13-4　黄土高原农业恶性循环图(马志正等　1998)

1) 不适宜的农垦。在人类发展过程中，开垦草原一直是增加农田的主要途径之一。古今中外也确有许多草原变成了“大粮仓”。但是，由于草原多处于气候条件比较严酷、生态环境脆弱的干旱与较冷的地区，盲目开垦以及垦后的管理不当，常常造成既达不到粮食增产的目的，又使草原植被遭到破坏的局面。

2) 超载过牧。在一些牧区，存在着严重超载放牧、过牧现象，增加了草场的负荷，使草场由于过度啃食，得不到再生与更新的机会而逐渐退化，加之牲畜的践踏范围和频度急剧增加，从而使草场植被和土层遭受到破坏，而这又反过来限制了草地的生长。长时间的恶性循环便使草原逐渐贫瘠、退化直至沙漠化。在我国北方地区草原沙化的成因中，超载过牧是居第二位的重要因素。如以呼盟阿木古朗镇居民点附近羊草原退化为例(表 13-5)，该群落由羊草草原退化为更旱生小半灌木群落，地上生物量降低 10 倍，且利用率和营养价值也显著下降。

3) 乱砍滥伐。在一些山区和牧区，由于急于一时的经济利益和烧柴的问题，乱砍滥伐，使大量森林植被被破坏。

4) 不合理的农业活动。如大水漫灌，又不及时排出，造成土地次生盐碱化，破坏土壤结构，使地表植被破坏。

表 13-5　呼盟阿木古朗镇居民点附近羊草原退化阶段

退化阶段	半径距离 /km	群落建群种、优势种	草群高度 /cm	盖度 /%	地上生物量/(t/hm^2) (以鲜重计)
正常	>10	羊草、大针茅	30	85	7.21
轻度退化	6~10	羊草、糙隐子草	22	65	2.10
中度退化	<5	糙隐子草、冷蒿	13	45	2.11
重度退化	<5	冷蒿旱生杂类草	6	40	0.65

引自章祖同　1990

四、减轻旱灾的措施

干旱和雨洪一样，都是由于降水量的变化而引起的，加之当地的小气候生态环境共同对干旱灾害产生影响。因此，减轻旱灾则应针对降雨量的大小来调整生产，同时通过改善局地的小气候来调节降雨量而达到减灾甚至于免灾的目的。

1) 在一些干旱或半干旱地区，实施抗旱耕作体系。对土壤以深松为主，同时结合耕茬法及耕耨结合的耕作方式，减少土壤水分散失，有效利用耕层贮水，以达到增产丰收的目的。因地制宜地采用不同的节水灌溉方法，如喷灌、滴灌、渗灌等，既可以提高水的利用率，使灌水均匀，又不破坏土壤结构，并适当地调节土壤中的水分、养分和空气状况。减少水分在灌溉过程中的损失，又可以减少地面流失和蒸发的损失，有利于防止土地盐碱化。

2) 利用先进的科学技术，进行人工降雨。针对不同的云层特点，使用不同的催化剂，从而达到降低旱灾的损失，近年来人工降雨取得了重要进展。

3) 加大植树造林，恢复植被的力度，改善局域小气候，维持生态系统的水分平衡，降低干旱灾害的发生，减小旱灾的损失。

第五节　台　　风

一、台风概述

所谓的台风，即是热带气旋的一种。热带气旋是生成于热带海洋上的大气涡漩，其最大风力可以达到或超过 8 级(相当于风速 32.7m/s)，在不同地区有不同的名称。在大西洋和东北太平洋地区称为热带风暴(风力为 8~11 级)和飓风(风力在 12 级以上)；在印度洋地区称为气旋；在西北太平洋(如我国、日本)称为台风。在我国台风最早见于宋朝，写作为“风”，有些古书上也称为飓风。如在 1684 年的《福建通志》上就有关于“风”的明确记载。

在国际上对台风有统一的划分标准，我国于 1989 年元月起采用了国际标准，即热带低压，风速小于 17m/s；热带风暴，风速 17~25m/s；强热带风暴，风速为 25~33m/s；热带台风，风速大于 33m/s。一般将以上的热带气旋统称为台风。

台风形成的条件是多样的，主要有以下几个方面：

① 有广阔的海洋，一般发生在海水温度最高的地区和季节(海温大于 26℃或 27℃)，由海面吸取的感热量和潜热量(水气)达到最大。

② 使气旋旋转起来的动力。一般在北纬 5°至南纬 5° 间很少有台风发生，而在北纬 15° 至 20° 纬度地区最多。

③ 有东风波的存在，这是促进台风形成的一个重要条件。

④ 赤道无风带位置的季节性变化。

台风的分布具有地区性。世界上受台风影响最为严重的地区有三个：孟加拉湾北部及沿海地区；我国东南沿海、日本和东南亚国家；加勒比海地区和美国东部海岸地区。

二、台风的危害

台风对人类的危害主要是由强风暴雨和风暴潮所引起，破坏性极大，且是多方面的。古今中外，由台风所引起的灾害给人民生命财产造成损失的例子不胜枚举。如1970 年 11 月发生在孟加拉湾海岸的强台风，使上万平方英里的土地在短短数小时内面目全非，变成一片汪洋，平夷了许多村庄，夺走了 30 多万人的生命，使 100 多万人流离失所，470 多万人受到不同程度的伤害。耕牛和家禽死亡分别达 28 万头和 50 万只，庄稼的损失达 6300 多万美元，有近 3500 座学校受到不同程度的破坏，损失的渔船近 10 万条。而且台风所造成的损失又随着社会经济的不断发展，物质财富的不断积累而飞速增加。我国是台风多发地区，随着我国经济的不断发展，台风对我国的影响亦日趋严重(图 13-5)。

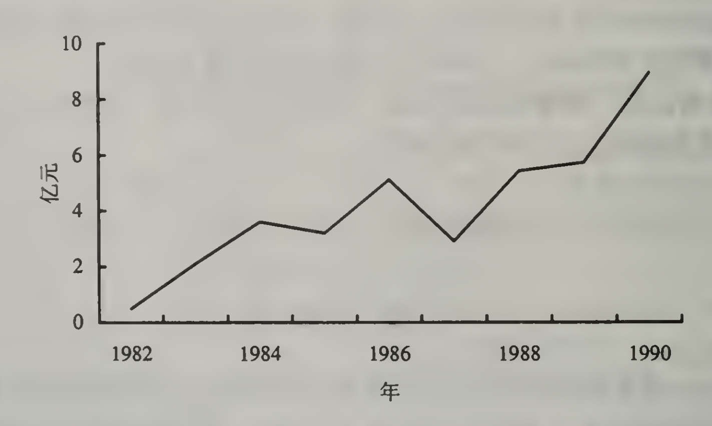


图 13-5　我国 1982~1990 年每年登陆台风造成的经济损失(国家科学技术委员会　1993)

造成的损失呈指数增长的趋势，平均每年超过 8 亿美元，约为 20 世纪 40 年代初期的 5 倍。台风的危害主要表现在三个方面，即：风害、水灾、潮灾。

1) 风灾。台风是一个强烈旋转的旋涡，风力很强。台风的瞬时风速常达 40~60m/s，较强的可以达 60~80m/s，有少数最强时可达到 80~100m/s。这样大的强大风力足以破坏建筑物，毁坏林木，倾覆船只。史籍中常记为“飓风拔木要屋”、“屋瓦皆飞”、“飓风覆舟死千余人”等等。较为典型的例子则如 1660 年 9 月 8 日的台风，据泉州府志载“飓风异常，作一昼夜，城中石坊飘折十余座，开元西镇园塔铜葫芦、铁盖飘朋崩坏”，其风力可以想见。据福建省历史记载统计，这种风灾占全部台风记录的40%。

2) 水灾。由台风降雨产生的洪水比风的破坏力还大。一般当台风通过时，常带来 150~300mm 的降雨，所产生的洪水能引起严重的灾害，尤其在山区。如 1955 年在美国，有一个台风移到陆地上时，本身引起的灾害并不大，但是在强风平息很长时期以后，给美国东部地区造成了大范围的洪水。而像这样的台风洪水并不少见，仅在美国，自 1886 年以来至少有 63 次之多。更有甚者，在菲律宾一次台风竟产生 2500mm 的降雨，这比有些地区全年降水量还大 2~4 倍。

3) 潮灾若台风发生时正好遇上朔望时节的大潮，所造成的风暴潮灾害则可能比台

风暴雨的灾害严重得多。$1m^3$ 的水重 1t，若受巨大的波浪的长期冲击，可以冲坏许多建筑物。而且台风潮的侵蚀力是人们难以想象的，它可以在几小时内冲刷掉海滩达 9~15m 之远，一个强台风持续 5~6 小时，就可把几公里内 3~7m 高和几百米宽的砂丘完全冲刷掉。如我国历史上的 1297 年(元大德元年)8 月 3 日“飓风大雨，海水高二丈，平阳瑞安二州溺死六千八百余人”，又如福建 1603 年 9 月 9 日“飓风大作……是日海溢，堤岸骤起丈余，侵没漳浦、长泰、海澄民舍数千家，人畜死者不可胜计，有大番船冲入石美城内，压坏民舍”。据福建统计历史上这种台风挟海潮造成洪灾的情况约占台风总数的 5%。又如 1970 年的一个强热带风暴于 11 月 12 日(农历十月十四)在孟加拉湾北部登陆，海浪高达 7m，沿海岛屿和大片陆地被淹，9 千只渔船被毁，死亡人数达 30 万之多。

三、台风灾害的原因

台风能成为灾害的主要原因是自然因素，其发生发展在大气环流过程中。在一个初始热带扰动场中，在高温高湿的洋面上，通过积云对流活动，由于大量凝结潜热被释放，使原来的冷性扰动变为暖心结构的热带气旋，加之当地的地转偏向力大于一定值及对流层中风速垂直切变比较小，使热带气旋最后发展成为台风。

台风若只在海洋上就很少能造成经济损失，也就难以称为灾害，只有当台风登陆以后，才能对人们的生命财产造成一定的损失，这时就被称之为灾害。人类活动能使台风可能产生的损失加大，如在沿海一带毁坏防护林，使台风登陆以后长驱直入，给人民生命财产带来巨大的影响。同时，由于海岸沿线的植被被破坏，加剧了台风造成的风暴潮对海岸的侵蚀作用，也加剧了洪水灾害。

四、台风灾害的防预措施

对于台风灾害的防预措施，首先要做好台风的预报工作。除了利用先进的台风预测预报系统，如气象卫星、电子计算机及配有特殊装置的飞机，对台风进行及时的预测预报，监控已生成台风的动向，提前做好防灾抗灾的准备，减少台风造成的损失。同时，还可以根据民间谚语、节气等人们的生活生产经验，通过看风、看潮、看冷暖等，了解台风的发生发展趋势，提前做好抗台风、防台风灾害的准备。例如，在冬季，广东就有“有奇寒就有奇风”之谚语，在福建省龙海县也有“小寒冷到哭，小暑台风到”等谚语；在春季，用“清明前后北风起，百日可见台风雨”，“鹊巢占风，巢高风小，巢低风大”等；在夏季，有“端阳无有龙舟水，六七月则有台风暴雨水浸腿”等之说法，利用这些也可以对台风进行预报。

其次沿海岸线应进行植树造林，种植草被，改善沿海的环境，从而对减弱台风的风速，减小海潮对海岸线的冲刷，减少沿海的水土流失，削弱台风灾害都有重要的作用。另外，要采取工程措施，修建护坝、护墙、护提等，堵截海潮，保护海岸线安全。

第六节　其 他 灾 害

一、土地退化与荒漠化

(一) 土 地 退 化

所谓的土地退化，即土地数量在不断减少，土地质量在不断降低的过程。土地数量的减少则主要表现为表土的丧失、土体的毁坏，或耕地数量的非农业占用；土地质量下降会影响到国民经济的发展，民族的兴衰，乃至于威胁到人类的生存。土地退化又常被称为“宁静的危机”或“渐变的灾难”。

我国的土地资源的自然条件普遍较差。可以概括为“一多三少”，即总量多，人均耕地少(图 13-6)，高质量的耕地少，可开发的后备资源少。

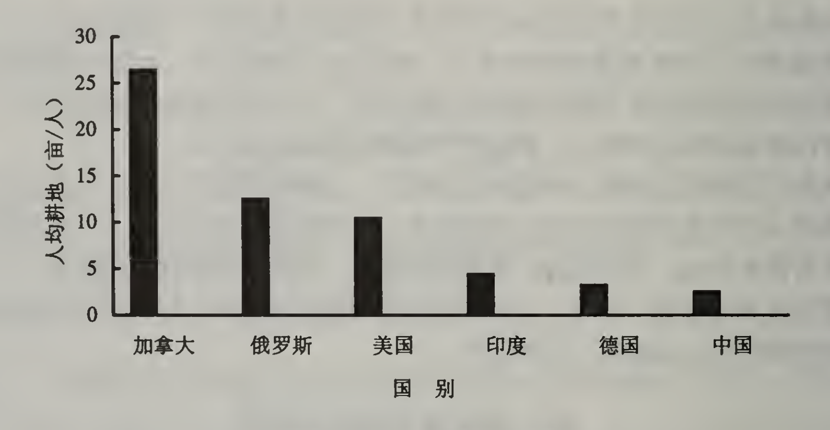


图 13-6　中国人均耕地与世界人均耕比较(潘文灿等　2001)

造成土地退化的原因很多，其表现形式也是多种多样，其发生和发展都是在不同的诱发因素与地面组成物质之间相互作用、相互影响和相互制约的物质运动和能量转化的过程。这一过程的存在则是由于自然因素和人为因素双重作用的结果(表 13-6)。

土地退化使生态环境恶化、土地生产力下降、耕地减少、江河湖库淤塞、加剧旱涝和山地灾害、污染水体。严重的土地退化可使自然系统功能减弱，土地肥力下降，生产条件恶化。使人民生活水平无法提高，经济和教育状况无法改善。危害是多方面的。

表 13-6 土地退化类型

Ⅰ 级	Ⅱ 级
水土流失	水蚀 重力侵蚀 冻融侵蚀
土地沙漠化	风力侵蚀 风积
土地盐碱化	盐渍化与次生盐渍化 碱化
土壤性质恶化	土壤板结 土壤潜育化 土壤酸化 土壤养分亏缺
土壤污染	无机物(包括重金属和盐碱)污染 农药污染 有机物(包括生物易、难降解的有机毒物)污染 化学肥料污染 污泥、矿渣和粉灰污染 放射性物质污染 寄生虫、病原菌和病毒污染
耕地的非农业占用	

据龚子同等 1990

(二) 土地荒漠化

对于土地沙漠化概念的表述，不同的学者有着不同的看法。“荒漠化”一词，来自英语“desertification”，译为“沙漠化”或“荒漠化”。我国学者对沙漠化的理解，也存在着沙漠化和荒漠化的两种提法。朱震达研究员等认为：“沙漠化是沙质荒漠化的简称，可简单概括为：在干旱、半干旱(包括部分半湿润)地区，脆弱的生态条件下人为过度的经济活动，破坏生态平衡，使原来并非沙漠地区出现了以风沙活动为主的类似沙质荒漠的环境退化。”我们认为沙漠化是在人为和气候这两因素的作用下，使干旱或半干旱地区植被退化、沙化，土地逐渐呈现出沙漠景观的过程。

联合国环境计划署有关资料显示，土地沙漠化或正经历沙漠化过程的地区遍及六大洲的 110 个国家，全球有 10 亿人正经受沙漠化的威胁，其中 13 500 万人在短期内有失去土地的危险。沙漠化危及全球近 1/3 陆地面积。撒哈拉大沙漠的流沙每年向南扩展 150 万 hm^2，向北吞没 10 万 hm^2 农田。亚洲沙漠化地区已占总面积的 1/3，欧洲地区由于前苏联的过度开垦而造成的生态恶化已影响到 400 万 km^2 的广大地区。

在土地退化与土地沙漠化的过程中，人类的影响是不可低估的。人类违背自然规律，一方面人口在迅速地增加，另一方面对生活水平的需求不断提高，导致更进一步强度利用土地资源，结果形成了“越是强度利用土地资源，土地沙漠化就越严重，生活就越贫穷，而越贫穷就越要强度利用土地资源，土地资源破坏就越严重”这样一个恶性循环。

二、冰　　雹

冰雹是雷雨云中的水气凝华和水冻结相结合的产物，形状多为圆形或椭圆形。直径在 2cm 左右，有时可以达到 10cm 以上或者更大。这样大的冰雹，平均重量多在 0.5kg 以上，有的达到 2~4kg。其密度平均为 0.7~0.8g/cm^3，大冰雹的降落速度可以达到 30m/s 以上。

一般地，冰雹的出现是局部的，降大雹的范围就更小，由几十米到几公里；降雹的持续时间相对短暂，由几秒到几十分钟，但冰雹给人们的生产生活的影响是相当严重的，如江西萍乡市在 1998 年 4 月 22 日遭冰雹大风袭击，冰雹最大直径超过 75mm，受灾地带长约 60km，宽约 10~15km，局部地区积雹厚度达 10cm 以上。据不完全统计，全市直接经济损失达 3 亿元。

我国是自然灾害比较严重的国家之一，其中冰雹又是我国自然灾害中影响最严重的灾害之一。比如吉林省每年都有冰雹天气发生(图 13-7)，其年平均降雹 83. 6 站次。冰雹发生最多的年份是 1980 年为 155 站次；最少的年份是 1994 年仅为 30 站次，相当于最多年份的五分之一。每年粮食作物遭受雹灾的面积就达数十万至上百万公顷，粮食减产数十万至数百万吨。据吉林省民政厅资料统计，1983~1992 年期间，雹灾造成的粮食作物的成灾面积平均每年 50 余万公顷，占全部自然灾害成灾面积的六分之一，平均每年减产粮食 20 多万吨。

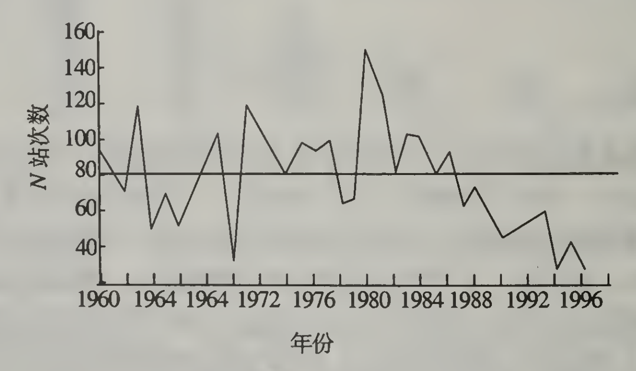


图 13-7　吉林省年降雹分布曲线图(王晓明等　1999)

冰雹的防治方法主要有两种：一种是将催化剂投入到成雹的云中，增加云中的凝华核，使其成为雹的胚胎，促进水滴很快下落，减少云中的水分使小雹不易形成大雹；另一种方法是采用爆炸，引起空气强烈的振动，使上升气流受到干扰，同时增强云的相互碰并机会，使其能迅速地增大成雨而降落。

三、霜　　冻

霜是当空气遇到冷的物体表面而温度降低到冰点以下时，空气中的水气凝华而聚集在物体表面上的固态凝结物。引起霜的天气条件是要有冷空气侵袭或地面强烈辐射，因此，冷空气侵袭后不久的晴朗天气，最易成霜；洼地与山谷地区，容易积蓄冷空气，成霜的频率最大。霜冻能使农作物受害，霜冻强度愈大，作物受害就愈重，霜冻持续时间

愈久，作物受害愈重，霜冻之后，温度回升速度愈快，作物受害也愈重。

防止霜冻对植物伤害的方法有物理方法和生物方法，物理方法主要是通过减弱辐射冷却，提高贴近地面气层温度的一些措施，如熏烟法、加温法等。生物方法则是利用植物能调节局地气候，通过增加植物覆盖而改善周围环境条件，如植树造林，扩大绿化面积，利用植物来减少地面辐射，防止气温的骤然变化而阻止霜冻的产生。

四、病　虫　害

病虫害是农业、林业生产的首要大敌，在农业上，每年由于病、虫等危害，粮食的损失约为 25%。如在 1998 年，四川省农作物发生的病虫害达 1.25 亿亩，农田鼠害为 4500 万亩，农田草害达 5500 万亩，森林病虫害也达到 420 万亩。随着农业的不断发展，塑料大棚、玻璃大棚等的应用越来越广泛，温室害虫也严重地影响着温室经济的发展，如温室白粉虱、棉叶螨、蚜虫等害虫。

随着化学农药在农业上应用的诸多消极影响的增多，对于病虫害的防治，现在越来越趋向于通过利用生物之间的相互作用关系来达到消除或减少病虫害的目的，如以生物农药逐渐代替化学农药，一般所使用的生物农药包括细菌农药、真菌农药、病毒农药和抗生素农药四大类。

灾害生态学提倡通过生存竞争，利用天敌达到控制害虫的发生与发展，如利用赤眼蜂控制棉铃虫、小地老虎等害虫，其是全世界害虫生物防治中应用最为广泛的天敌昆虫。1986 年据著名的生物防治专家 Gteathea 估计，全世界农林作物中应用赤眼蜂防治害虫每年大约有 1.6 亿 hm^2，其中俄罗斯、中国、美国等国家应用面积较大。赤眼蜂是一种卵寄生昆虫，它将害虫“杀”死在卵期，从而有效地阻止了幼虫对作物的危害(陆庆光　1993)。

第十四章　有害动物管理生态学

第一节　导　　论

一、有害动物的概念

所谓有害动物(pest animal)，是指那些对人类生存和生活起着有害作用的动物，大多数为昆虫，这些昆虫为害严重，给人类造成重大经济损失。美国有 100 多种昆虫和螨类为害棉花。1959~1960 年平均每年损失 5000 万美元，约为年产量的 19%；印度 1963~1964 年因虫害损失粮食 15%，约计 1300 万 t；据 1956 年统计，我国因病虫害每年粮食约减产 10%，棉花约减产 20%以上，果品约减产 40%。Cramer(1969)根据世界各地许多资料分析研究，估计世界上农业因虫害损失每年产量的 13.8%，价值 200 亿~300 亿美元，这些数字说明有害动物管理的重要性。

二、有害动物管理存在的问题

人类与有害动物之间的战争已有 4000 多年的历史。20 世纪初，由于工业技术的发展，人类对付害虫的方法有了重大发展，特别是 40 年代出现的有机氯和有机磷杀虫剂，化学防治曾盛行一时，并曾誉为《昆虫学的黄金时代》，时止今日，化学防治(chemical control) 仍是最主要的方法之一。但化学防治的缺陷和对生态系统的影响也已众所周知。

有害动物的控制管理进入 20 世纪 60 年代，国内外大多以单种作物上的一种害虫或多种害虫为对象，采用几种控制措施，或多种系列组合措施，进行控制，这种控制对策称为害虫的综合防治(comprehensive control)。害虫综合防治对策在生产实践中，不论对害虫的控制或获得的经济效益，均较以前“单种害虫单向控制”的对策效果显著。但随着大面积控制的开展，在实际工作中，愈来愈感到害虫综合防治对策，对于进一步解决复杂的害虫控制问题，或实际中出现的问题，已无能为力，主要表现在：

① 在对害虫控制所用的措施中，其作用往往有正负两面，这样的事例很多，如国外推广棉籽醇含量高的抗棉铃虫品种，往往利于蓟马的繁殖，其上棉蓟马种群数量是普通品种上的4 倍以上。一些多毛品种虽兼抗蓟马、叶蝉，却又特别吸引棉铃虫而招致受害。再如作用位点特异性强的药剂连年施用，促成害虫、病菌抗药性的发展，迄今为止已发现的抗药性已超过 200 例，而广谱性杀虫剂不免同时误杀天敌与有益生物。轮作、间作可以对某些害虫达到控制目的，但亦可引起另一些害虫的猖獗。从这些事例中说明，在采用控制措施时，如何既利用了其有利的一面，又使不利的作用协调于总体系统

中，不能表现出来，变被动为主动，这是上述对策不易解决的问题。因此就出现了在田间推行这些措施时，常注意其主效应方面而忽略了副作用方面，或只强调其有利的一面而低估了其有害的一面，因而在措施较大面积推广后，才逐渐发现其不良的效应，形成被动的局面。

② 在对害虫采用控制措施组合，是否就是最优的方法？是否其中还有哪些方面(或措施)需要改进？或如何改进？如何用科学的定量方法表达出来，这亦是当前的综合防治对策无能为力的。

③ 在采用一种或多种系列措施时，必然会影响到整个生态系统的组成结构，由于系统结构的改变，势必引起农田作物系统功能的改变，对于采用这些措施后，对农田作物生态系统的结构与功能的一系列作用动态，应用上述对策是无从预测的或模拟的。这些都影响到当前害虫综合防治对策的深入与提高，尤其在立体农业结构体系中的害虫管理对策，更为特殊。由于这一体系的结构是复杂的，层次是重叠多样的，因此组建优化的立体农业生态系统的指导思想，是要求我们从整体出发，在生态学的控制原则与经济学的管理原则指导下，善于因势利导，将系统内外一切可以利用的力量与能量，转到可利用的方面，来为系统的总体功能服务，这方面还没有相应的有效手段。

第二节　有害动物管理的原则

一、有害动物管理的生态原则

(一) 物质循环再生原则

生态系统与机械系统最大的区别，在于生态系统是具有生命的系统，它是由活性状态与非活性状态组成的系统，如果失去活性，系统即行消亡，因此必须保持活性状态在系统中的循环与发展，方能使该生态系统功能持续繁盛。例如土壤中施用化肥、农药，可引起土壤活力下降，从而改变土壤结构，影响到整个生态系统的功能。再者，由于生物圈内的物质是有限的，因此原料、产品和废物的多重利用及循环再生是生态系统能够不断持续发展的基本对策，即系统内部组分，既是下一组分的“源”，又是上一组分的“汇”，没有“因”与“果”之分，物质在其中循环往复，充分利用。这个原则既要求我们在进行害虫管理时，应考虑生态系统内活性状态的发展与物质的多重利用，循环再生，才能使系统的功能持续发展，亦要求我们在思维方法上，应抛弃传统的有因果关系的单目标线性思维方法。

(二) 食物链食物网完整原则

生态系统中的生产者、消费者和分解者都是通过一定的食物链相联系，各食物链相互交错形成食物网。食物网链一旦破坏，生态系统结构就会破坏，系统的功能就会受到影响，从而影响到系统的生产能力。因此，在控制害虫时，必须保证食物链、食物网的

完整，这是一条基本原则。这一方面的教训是深刻的。在单一使用化学防治时，食物链很易被破坏。比如，用杀虫剂防治棉蚜，往往会出现越喷药，棉蚜越猖獗，就是因为一方面棉蚜产生了抗药性，另一方面因为许多棉蚜的天敌被杀死，食物链遭到破坏，害虫失去了天然控制。这方面的例子非常多。

（三）协调共生、和谐高效原则

共生是不同种的有机体或子系统合作共存、互惠互利的现象。其结果是使所有共存者都大大节约能量，使系统获得多重效益。这种现象在自然生态系统中普遍存在，其中生物都占领着可利用的生态位，摄取一切可利用的能量，形成最佳的物流与能流的利用状态，使整个系统表现出高效、和谐，并达到持续发展。

协调共生原则还要求我们，在考虑控制对策时，应善于因势利导，将系统内外一切可利用的能量和条件转到可利用的方面，为系统总体功能服务，即尽可能地变对抗为利用，变控制为调节，变征服为驯服，化害为利。

（四）相生相克协同进化原则

生态系统中充满激烈的动物与植物之间，动物、植物内部各物种之间的竞争与相克关系，通过这两种作用关系，使物种经受自然选择，达到优胜劣汰，适者生存，使生态系统得以保持暂时的平衡，达到物种间的协调进化。

在昆虫群落中，应用“种间竞争排斥原理”和捕食者与猎物、寄生物与寄主相互作用关系原理，对害虫进行控制，这早已为人所熟知，而在植物类群中，利用植物释放克生物质，来对其他植物或植食性动物进行抑制，则是近 20 年来化学生态学家研究的结果。植物的克生作用，包括自克作用与他克作用两类。自克作用是物种在不利环境下，利用它来控制自身数量，以保持持续繁衍。如水稻残株可释放出ρ-香豆酸，ρ-羟基苯甲酸，抑制了第二季水稻幼苗生长。1987 年我国台湾调查因此减产达 25%。他克作用表征了物种的进取性及抵御其他物种入侵的能力。例如向日葵、豚草可产生酚酸来抑制豆科植物形成根瘤菌和固氮作用，高粱释放的蜀黍苷、大麦根释放的芦竹碱、小麦和裸麦残株产生的ρ-苯基乳酸、ρ-羟基丁酸来抑制或杀死杂草，等等。因此，如果理解了自然机理，使轮作制度、耕作制度、栽培选择及种植结构等趋于合理，即可化损失为收益。这不仅有利于保护生态环境，亦可提高生态系统功能，并达到控制害虫的效果。

（五）物种的抗逆性原则

当物种受到外来的侵害后，不仅可产生一定的耐性，而且还可产生明显的抗逆性，用以抑制或消灭其危害。例如马铃薯的叶子被马铃薯甲虫危害后，在几小时内可释放出 4 种蛋白酶抑制剂，而在 48 小时内可将未被害叶内的全部可溶性蛋白的 10%都转化成蛋白酶抑制剂，这些成分大大束缚了植食性害虫的消化酶，从而阻延了蛹的发育。植物

这种防御系统已在四大主要类群的 20 个科中得到证实。再如植物被咀嚼式口器的害虫取食时，可释放出氰酸来影响害虫的呼吸链，从而达到杀死害虫的目的。现已发现在真菌、蕨类植物、裸子植物、双子叶植物、单子叶植物的 80 个科中已有 800 种以上可产生氰酸。再者植物在其生长发育过程中或被害虫危害后，可产生多种次生化合物，来适应其他生物的关系。这些物质可以作为对害虫的抑制剂、诱集剂、信息素等。例如异体作用素(allelochemics)对害虫既有引诱作用、拒避作用，还有很好的自然抗性作用。而多羟生物碱存在于多种植物中，它是昆虫的糖苷酶抑制剂。

(六) 物种的变异性原则

近年来的研究证明，在同一农田中，不仅植株之间呈异质性环境，而且即使同一植株中，其体内成分分布在不同时间、空间或不同部位亦有很大的变异。例如罂粟叶中毒素吗啡的浓度，上午最浓，而可咔因和蒂巴因却在下午最浓。氰酸在许多植物的根、种子及其他部位都有，但叶中浓度最高。酚醛是许多植物中具有强烈防御功能的物质，它在狭叶三角杨中的分布，是从叶的基部到端部逐渐增高的，小叶比大叶的浓度为高，因而甜菜瘿绵蚜对叶的选择表现出对大叶基部有强烈的喜好性。这就是物种自然选择、协同进化的结果。再如植物的次生物质在植物生长季节还可进行器官之间的转移。马铃薯中的茄定浓度，随着植株的生长，块茎中减少，而叶中增加。番茄中番茄苷的转移，系从根部通过输导作用转移到花，当受粉后，子房中番茄苷的浓度可增加到 1.5%。果实成熟时，其量仅有痕迹而已。在 *Cotyedon* 属的植物中，整个发育阶段和叶形成初期，皂角苷物质很多，幼叶中则强心内酯苷很浓，而螺甾烷酮则累积在成熟的第二年的叶子中，这就使植物性害虫必须同时面对上述每种毒素的作用，以及这三种化合物浓度的迅速变化而发生的交互作用。这就是植物的镶嵌原理，它是对付害虫产生解毒机制的有效方法之一。

(七) 系统的自组织、自协调、持续调控原则

生态系统是一个与外界有物质交换、能量流动的开放系统，亦是一个处于非平衡态的自组织系统，生态系统中的各级结构具有自行协调、自我组织、自我维持的稳定性机制，因此形成一具有自我调节功能的系统。这样，自我调节能力的强弱，就是区别机械系统与生态系统的主要依据之一。生态系统的演替发展目标，在于整体功能的完善，而不是其组分结构的增长。由于系统中的负反馈作用一般总是大于正反馈作用，这就要求一切组分的增长都必须服从整体功能的需要，任何对整体功能无益的结构增长，都是系统所不允许的。在进行害虫管理时，应将此作为该农田生态系统的组分结构来考虑，进行整体措施的综合协调，充分利用系统的自我调控原理，来达到控制害虫的目的。

二、有害动物管理的经济学原则

有害动物管理的经济学原则，就是应用经济学的边际分析原理进行管理，即管理

必须遵循挽回收益大于或等于管理费用的原则。最理想的是，在明确的目标函数与约束条件下，使边际收益等于边际费用。亦即挽回收益与管理费用的导数为零时，此时所获的经济收益为最大 (图 14-1)。

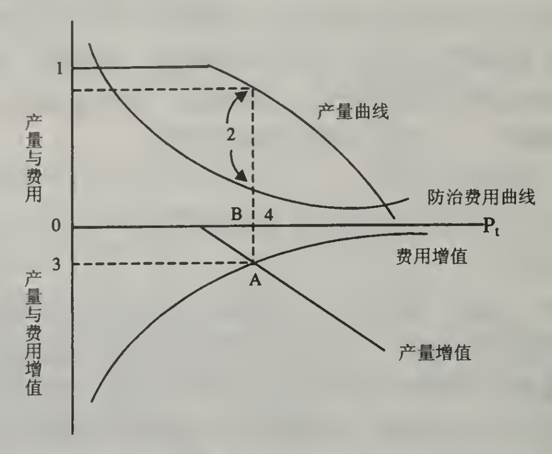


图 14-1　产量、防治费用与害虫密度的关系(Headley　1971)

从图中可以看出：点 1 是当害虫种群不存在，或损失在统计学上没有意义时，收获的正常产量 。点 2 是产量函数的变化率与防治费用变化率的等值点。点 3 是防治费用增值与产量增值的等值点。点 4 就是对应于点 2 与点 3 的害虫种群密度，亦即此时对害虫密度进行管理，经济效益最大。

第三节　有害动物的生态因子调控

一、生态因子调控原理

任何生物，不论是有害的还是有益的，都生存在一定的生态系统中。系统中任一因子的变化，都会引起生物的变化，这种变化对生物本身来讲可能是有利的，也可能是有害的。若其有利，则可促进生物生长发育，发生发展；若其有害，则能抑制生物的生长发育，发生发展。根据这一原理，在人为控制下，改变某些系统因子，使其不利于害虫的生存。这样就可以达到抑制害虫、减轻为害，保护植物的目的，这就是生态因子调控(ecological factor control)，也叫生态治理(ecological management)。也就是通过改变生态因子，起到抑制作用。

生态治理并非要彻底消灭害虫，只是通过环境因子的调节(environmental factor regulation)，把害虫控制在最低危害水平，维持自然平衡，确保作物丰产。事实表明，任何一种要根除害虫的战略都是注定要失败的。再则，即使我们根除某种害虫得以成功，对人类也不一定有什么益处，有时会得到相反的报应。这种报应可能在短时间内人们还认识不到。

二、生态因子调控方法

根据生态因子的类型，生态因子调控可以分为以下几方面：

(1) 光因子调节(photo-factor regulation)

光是重要生态因子之一。光照时间、光谱成分对昆虫都有重要影响。对不同波长的光，昆虫有不同的反应，因种而异。一般每种害虫都有自己的光敏感区，也就是说对该区的光它有明显的趋性，如夜蛾科昆虫大都对紫外光区的光有趋性，而对这一范围以外的光波则有回避性。根据这一特点，在生态系统中调节光源，可达到防治的目的。如在农田生态系统中增加一些色带屏障，可以诱杀对该光有趋性的害虫，而对那些有回避性的害虫则有抑制作用。近年来在农业上采用的黑光灯、诱蚜板等就是光因子调节的例子。

研究表明，昆虫的滞育与光周期关系最为密切。各种昆虫都有其滞育的临界光周期，如桃小食心虫(*Carposina niponensis*)在 25°C 恒温下，导致 50%的个体进入滞育的临界光周期约为 14 小时 20 分，长于或短于此，滞育率明显提高。这说明桃小食心虫只有在狭窄的光照范围内发育时(每昼夜 15 小时左右)，绝大多数个体才能免于滞育(黄可训 1976)。根据各种害虫对光周期的反应，调节光照时间，使其进入滞育，可减轻为害。就目前科学水平来说，在温室，人工气候条件下，这一措施是可以实现的。昆虫一旦进入滞育，要想解除之，恢复生长发育，必须通过一定环境条件的作用，才能实现。一般是要经历一定的低温期。如果不能满足，昆虫就不能恢复生长，这样人为控制温度，也可达到抑制害虫的目的。这就是下面要讨论的温度调节。

(2) 温度调节(temperature regulation)

温度是另一重要生态因子。温度的变化直接影响着害虫的生长发育。改变温度使其不利于害虫的生长发育。可以起到抑制害虫的作用。一般自然温度非人为所能控制，但人们可以利用温室、人工大棚、人工气候室等条件进行模拟试验。上面讲到的，调节温度，不给滞育的害虫以低温刺激，使其永远处于滞育状态，不能恢复生长，从而减轻为害就是一例。

(3) 水分调节(water regulation)

水是生命的基石。任何生物对水都有基本的要求，害虫也不例外。这种要求若不能得以满足，它的正常生活就要发生障碍。倘若人们掌握了各种害虫对水分的需求规律，就不难设计出通过水分调节来防治害虫的方法来。

现在关于害虫与水分关系的研究越来越多。在这些研究基础上我们可以根据各种害虫对水分的需求规律，采取可行的措施，抑制害虫大发生。例如，黏虫(*Leucania separata*)四龄以下幼虫，前蛹和蛹的成活受环境湿度影响非常明显(金翠霞 1979)，成活率与相对湿度呈直线相关。在低湿条件下，低龄幼虫活动力下降以致死亡，直接减少当代虫口密度。对前蛹和蛹，低湿或直接引起死亡，或形成畸形蛹，或羽化不正常，致使失去活动和繁殖能力。一般老熟幼虫入土化蛹时，喜选择含水量为 15%的土壤。高于 17.5%或低于 10.0%含水量的土壤中，虫口分布明显下降。这种选择习性能维持土茧中一定的相对湿度，使前蛹和蛹不致因湿度过低而死亡。掌握了这些规律，或是在低龄幼

虫期人为造成暂时的“大气干旱”，或是在前蛹和蛹期灌溉土壤使湿度过高，或翻耕土地使湿度过低，起到抑制害虫，压低虫口密度的作用。

另外，降雨对害虫有明显的机械杀伤作用。人们往往有这样的体会，夏季中午，一场大雨之后，棉蚜为害很重的棉田，虫口密度突然下降，这就是降雨对害虫的机械损伤作用。这也可以通过人工喷灌的方法得以实现。

(4) 空气调节(air regulation)

害虫在其生命活动中需要有充足的氧气供应来完成体内新陈代谢过程中的氧化作用。若氧气不足，新陈代谢作用就要受到抑制。在这方面，对地下害虫的抑制是明显的。在土体中，相比之下，温度、水分比较稳定，对害虫起作用的主导因子可能就是空气。因此，调节土壤气体状况，能够达到抑制地下害虫之目的。

改变空气成分也能起到抑制害虫的作用，例如，糖醋诱杀。糖醋诱杀是利用某些害虫对糖醋这种特殊气味敏感的特点而设计的。当昆虫嗅到这种气味时，就向着气味源飞迁，因而可以集中迁灭。这种方法对夜蛾科昆虫的诱杀作用非常明显，实际上是通过增加空气成分而实现的，属于空气调节的范畴。

(5) 土壤因子调节(soil factor regulation)

在农田生态系统中，土体可以认为是一个独特的生态系统，它具有独特的结构，独特的物理化学性能及独特的生物区系组成。该系统中各因子的改变，将能影响到整个农田生态系统，其中包括对害虫的影响。近来研究表明：增施氮肥可以使棉铃虫增加，同时也使棉花增产(曾益良等 1982)，这是农田生态系统中复杂生态关系的体现，了解这些关系，人们可争取主动，控制害虫的发生。

(6) 生物因子调节(biological regulation)

生物因子是生态系统中最重要的因子。每一生态系统都有一定的生物成分，它们之间以复杂的食物关系相联系，形成错综复杂的食物链。通过食物链相互联系、相互制约、相互影响着。食物链中任一营养级的波动，都可导致其他种群的变动。因此调节捕食性、寄生性等天敌昆虫的种群结构，可以起到抑制害虫的作用。

近年来，我国各地广泛利用赤眼蜂(*Trichogramma* spp.)防治各种害虫，取得了显著的效果。用人工方法繁殖赤眼蜂，然后在害虫产卵盛期，把赤眼蜂释放于大田中，赤眼蜂再以卵寄生的方式控制着害虫的发生。利用赤眼蜂控制的粮食作物害虫主要有稻纵卷叶螟(*Cnaphalocrosis medinalis*)，玉米螟(*Qstrinia nubilalis*)；经济作物害虫主要有棉铃虫(*Heliothis armigera*)，甘蔗条螟(*Diatraea venosata*)，甘蔗二点螟(*Chilotraea infuscatella*)及甘蔗黄螟(*Eucosma schistaceana*)；森林害虫主要有松毛虫(*Dendrolinus* spp.)。对上述各种害虫的防治效果，一般在70%~90%。

荔枝是我国华南地区的特产水果，过去受荔枝蝽象(*Tessaratoma papillosa*)严重为害，曾用化学防治，效果很好。但由于连续用药多年，荔枝蝽象产生了抗药性。20 世纪 60 年代用一种卵寄生蜂——平复小蜂(*Anastatus* sp.)来防治这种害虫，效果十分满意。放蜂后，卵寄生率在 90%以上，大大减少了荔枝蝽象的为害。同时，麻雀啄食也有明显作用。

在我国广大棉区，利用七星瓢虫(*Coccinella septempunctata*)控制棉蚜也是一个成功

的实例。在我国中部地区，七星瓢虫每年 3 月初开始在麦田活动，捕食麦蚜(*Macrosiphum granarium*)，并进行繁殖，到 5 月中旬在繁殖较多的麦田里，每亩密度可达到 6000~8000 头，5 月中下旬就开始向棉田转移捕食棉蚜，这样就能抑制棉蚜的大量发生。近几年，人们发现，在喷药的棉田中蚜虫的为害反而重于不喷药棉田，这就是因喷药，杀死了七星瓢虫等天敌昆虫，失去了对棉蚜的自然控制，从而造成其大量繁衍。

生态系统是一个复杂的体系，任一因子的改变都可以导致其他因子变化。因此，必须注意各种因子的综合效应，找出对害虫起主导作用的“限制因子”(limited factor)，使一种因子调节可能得到最佳效果。另外，某一因子调节可能对一种害虫起抑制作用，而对另一种害虫则可能起促进作用。再则某一因子的改变，也可能与天敌的生存发生矛盾。因此，我们必须运用系统论、信息论、控制论的原理，运用系统模型和电子计算机模型加以控制，选择最优方案。

第四节　有害动物生态系统调控

一、生态系统调控的原理

在农田生态系统中，作物-害虫-天敌相互作用，相互制约，通过能量、物质、信息的流动构成了一个有序的整体。显然，进行害虫的管理也必须从这个整体出发，根据生态学与生态控制论的基本原理，对生态系统和食物链的能流进行合理的调节与控制，因势利导地将系统内外一切可以利用的能量利用起来。如作物的耐害补偿与抗性功能，害虫的胁迫作用，天敌的控制能力，以及其他害虫控制技术，增产手段等，转变为可以利用的方向、变对抗为利用、变控制为调节、化害为利、因地制宜，通过生态工程手段，寓害虫管理于农事活动之中，使整个农田生态系统获得最大的功能效益，致力于农业生产的高效、低耗和持续发展。这样就达到了系统控制的目的。

二、生态系统调控的方法

生态系统调控方法对于不同的生态系统类型、不同的地域以及不同的发育阶段有所不同，但其基本原理是一致的。现在以棉田生态系统为例说明生态系统调控方法。

根据害虫生态调控的基本原理和不同时空类型棉田生态系统棉株-害虫-天敌能流变化特征，有以下生态调控方法。

(一) 调控棉株——害虫的能流关系

① 进行麦棉连作，种植夏播棉，切断害虫的能流食物链，避减苗蚜和二代棉铃虫种群的能量生产。比如 1991~1992 年在河北省饶阳县麦后(6 月 15 日)种植特早熟棉花品种“矮早一号”的结果表明，该棉花在7 月1 5 日才现蕾，因而避免了常规棉田 6 月份发生的苗蚜和 6 月下旬到 7 月中旬发生的二代棉铃虫危害。第三、四代棉铃虫的发生也减轻。换言之，如果大面积推广这一措施，则可解决华北棉田棉铃虫、棉蚜等害虫问

题。

② 在一定时期内摘除所有的棉蕾，改善棉株的能量分配，诱导棉株的超补偿功能和抗性作用。现已证明，去除一定数量(8 个)早蕾，可使棉株产生超补偿作用(盛承发等 1986)。如果去除棉株上所有的早蕾，棉株的产量如何呢？赖以生存的棉铃虫种群又将是如何呢？通过自 6 月中旬现蕾开始后每 5 天摘除所有棉株早蕾试验表明，随着摘除棉株所有早蕾时间的推后，棉株的最终铃数呈二次曲线变化，而单铃重呈线性下降，优化结果为 7 月 4 日，即在 7 月 4 日前摘除所有早蕾的棉株产量最高。由于去除了棉蕾，致使棉铃虫的产卵与取食受到很大影响，使其种群生产力显著下降。这样即发挥了棉株的超补偿作用，也发挥了棉株对害虫的诱导抗性功能。

③ 通过追施化肥、喷施生长调节剂、整枝等增强棉株的光合作用，使棉株的光合量高于害虫的摄入量，提高棉株的耐害功能。棉株—害虫的能流关系作用表明，当害虫利用棉株的能量高于棉株的光合量时，棉株的生长受到影响；反之，棉株通过其耐害补偿功能，其生长则不受影响。试验表明，合理地追施化肥，可以明显地提高棉株的耐害补偿功能，棉株的产量增加。喷施缩节胺等生长调节剂，可促进棉株的生殖生长，还可抑制棉铃虫的发生(戈峰等 1995)。

(二) 调控害虫——天敌能流关系

调控害虫与天敌能流关系，可以发挥天敌对害虫的控制作用。比如棉麦套作，可以增加瓢虫和捕食性蜘蛛的能量生产，提高它们对害虫的捕食利用效率。

保留一定数量的害虫，让自然天敌种群能量得以累积到一定程度，利用天敌的捕食对策，发挥它们在棉田中的调控功能。

化学防治成倍地减少天敌种群的能流参数值和对害虫的捕食利用效率。因此，使用选择性农药，保护和利用天敌尤为重要。

(三) 调控害虫种群能量生产，将其控制在一定水平之下

使用行为调节剂信息素，诱杀或干扰害虫的正常行为，抑制害虫种群的能量生产。合理使用化学防治措施，降低害虫种群生产力和摄入为害量。

根据各类型棉田棉铃虫、棉蚜种群能量生产的特点，在不同类型棉田使用新的管理政策。

棉铃虫 2 代期间，春季种的春播棉、春套棉田的棉铃虫种群生产力最高，为害系数最大，被害损失量最多。春播棉、春套棉田是重点保护对象。迟播棉田与夏播棉田的种群生产力较低，但其为害系数大，应着重保护棉株生长点。

3 代期间，以夏季播种的夏播棉、夏套棉、迟播棉以及春套棉的种群生产力最高，被害最多，对产量的影响很大，应特别注意加强防治，着重提高防治效果。

4 代期间，夏季播种的夏播棉、夏套棉和迟播棉田种群生产力高。而此时棉株生殖器官生产力低，棉株耐害补偿能力弱。因而棉铃虫种群的为害系数大，对棉花产量造成

一定的影响。应加强对第4代棉铃虫管理。

棉蚜苗蚜期间，春播棉田、迟播棉田蚜量密度较大，种群生产力较高，但其摄食效率很低，棉株有很强的补偿能力，基本上不用防治。

伏蚜期间，棉蚜的生产力和摄入量很高，吮吸了大量棉株汁液，对棉株产量造成很大影响。套作棉田和播种期推后的棉田受害严重，应加强对这些田块棉蚜的控制，并特别注意提高防治的效果。

秋蚜期间，棉蚜的种群生产力很低，棉株本身也在衰退，一般不需防治。

（四）调节区域性作物布局，控制害虫能量的获得

不同的播种期，或实行间套作，棉田棉株的长势不同，各时期害虫种群能量生产及为害系数差异很大。如果在棉区内并存着多种时空类型棉田，势必增加害虫能量获得的来源，使其转移为害，引起更大损失。因此要从景观生态学角度出发，合理地调节区域性作物布局，切断害虫转移为害的能流食物链，控制害虫能量的获得，降低害虫种群生产力。

（五）将生态因子调控寓于生态系统调控之中

害虫管理的最终目的是为了获得农业生产的经济生态效益，然而影响农业生产的因素很多，害虫管理只是其中一个。控制了害虫，也不一定能取得合理的经济效益。国内外有许多增产不增收的报道，甚至还有减产、增收的情况。与此同时，农艺措施对农作物生产的贡献值越来越大。显然，把害虫管理与其他农事操作分开来，是不适合当前农业生产需要的(戈峰 1992)。农事操作管理，实际上是生态因子调控，因此，将生态因子调控与生态系统调控结合起来，会取得更好的效果。

棉田害虫生态因子调控作为棉田生态系统调控的一个重要途径，必须服从系统整体功能的要求，与其他生态调控手段协调配合，寓为一体，通过综合、优化、设计实施，建立实用的生态系统工程技术，使害虫管理真正达到高效、低耗、持续的农业生产。

第十五章　景观生态学

第一节　景观和景观生态学

一、景　　观

景观的概念是多种多样的，但就一般讲，作为视觉美学上的概念，是指反映地形地貌景色的图像，诸如草原、森林、山脉、湖泊等；或是地理学上的理解，即某一地理区域的综合地形特征。这样理解时，景观的概念很接近于生态系统或生物地理群落这些术语。自 Troll 创造景观生态学以来，就有了景观的新概念，在景观生态学中，景观的定义可概括为，一个空间异质性的区域，由相互作用的生态系统组成，以相似的形式重复出现。显然，景观概念强调空间异质性，其空间尺度则随研究对象、方法和目的而变化， 而且它突出了生态学系统中多尺度和等级结构的特征。这一概念越来越广泛地为生态学家所关注和采用。景观生态学中的景观概念就是从直观的美学观，到地理上的综合观，又到景观生态学上异质地域观这样一步一步地发展起来的。

二、景观生态学的研究内容和基本原理

(一) 景观生态学研究内容

景观生态学(landscape ecology)是研究景观的结构、功能和动态以及景观的规划管理的综合性学科。景观空间格局、景观生态学过程及其与尺度之间的相互作用关系是景观生态学研究的核心所在。景观生态学的研究对象和内容可概括为 3 个基本方面：① 景观结构：即景观组成单元的类型，多样性及其空间关系；② 景观功能：即景观结构与生态学过程的相互作用或景观结构单元之间的相互作用；③ 景观动态：即指景观在结构和功能方面随时间推移发生的变化。景观的结构、功能和动态是相互依赖、相互作用的(图 15-1)。这正如其他生态学组织单元(如种群、群落、生态系统)的结构与功能是相辅相成的一样，结构在一定程度上决定功能，而结构的形成和发展又受到功能的影响。景观生态学研究的具体内容很广，而且常常涉及不同组织层次的格局和过程。比如，景观结构特征与生理生态过程、生物个体行为、种群动态、群落动态以及生态系统在不同时空尺度上的作用都属于景观生态学观察、研究的范畴(李哈滨　1988)。

景观管理是将景观生态学的基本理论，应用于生产实践。主要内容是通过分析景观特征，对其综合分析，提出景观利用管理最优化方案。具体来说，可包括下述内容：① 景观生态分类 ：根据景观要素的组成结构以及功能特点，划分景观(生态)类型；

② 景观生态评价：根据景观(生态)类型，评价对各种利用方式(如农、林、牧、工矿、城市、道路、建筑等)的适用性；进行景观生产力评价，并结合经济社会条件，结合投入产出，做出生态效益和经济效益评价；③ 景观生态规划设计；④ 景观规划设计的实施。

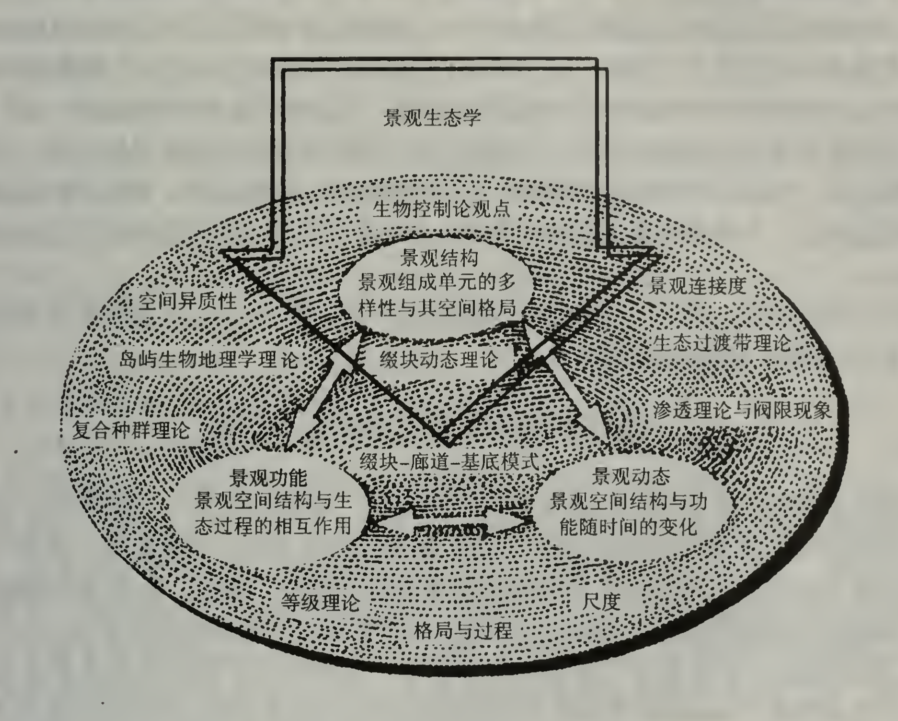


图 15-1　景观的结构、功能和动态的相互关系以及景观生态学中的基本概念和理论(李博　2000)

(二) 景观生态学原理

Forman 和 Godron(1990)在《景观生态学》一书中，对景观生态学中的基本原理，概括为七条。

1) 景观结构和功能原理。每一个景观均是异质性的，在不同的镶嵌体、廊道和基质之间，种、能量和物质的分配不同，相互作用(即功能)也不同。

2) 生物多样性原理。景观异质性使稀有的内部种的多度减少，使边缘种和要求两个以上景观要素的动物种的多度增加，因此景观的异质性可提高物种总体共存的潜在机会。

3) 物种流动原理。物种在景观要素之间的扩展和收缩，既影响到景观异质性，也受景观异质性的控制。

4) 营养再分配原理。由于风、水或动物的作用，矿物营养可流入或流出某一景观，或者在一个景观中不同生态系统之间再分配。景观中矿物营养再分配的速度，随干扰强度的增加而增加。

5) 能量流动原理。在景观内，随着空间异质性的增加，会有更多的能量流(热和生物量)通过景观要素之间的边界。

6) 景观变化原理。在不受干扰的条件下，景观水平结构逐渐向同质性方向发展，适度干扰可迅速增加异质性，而严重干扰则在大多数情况下使异质性迅速降低。

7) 景观稳定性原理。稳定性是指景观对干扰的抗性及其受干扰后的恢复能力。从景观要素来说，可分为三种情况：① 当某一种景观要素基本上不存在生物量时(如公路或流动砂丘)，则该系统的物理特性很易发生变化，而谈不到生物学的稳定性；② 当某一景观要素生物量小时(植被演替处于早期阶段)，则该系统对干扰的抵抗力弱，但是恢复能力强；③ 当某一景观要素生物量高时 (植被演替达顶极阶段)，则对干扰的抵抗力强而恢复能力弱。作为景观要素整体的景观，它的稳定性要决定于各种要素所占比例以及构图。

上述七条原理中，第 1、2 条属于景观结构方面，第 3、4、5 条属于景观功能方面，第 6、7 条属于景观动态方面。

三、景观生态学发展历史和研究展望

德国区域地理学家 Troll 于 1939 年首次采用了“景观生态学”一词(德文)。基于欧洲区域地理学和植被科学研究的传统，Troll 将景观生态学定义为研究某一景观中生物群落与主要生物群落之间错综复杂的因果反馈关系的学科。为此，Troll 特别强调景观生态学是将航空摄影测量学、地理学和植被生态学结合在一起的综合性学科。大约与此同时， 前苏联生态学家发展了生物地理群落学，其内容与早期欧洲的景观生态学相似。荷兰生态学家 Zonneveld 和以色列生态学家 Naveh 自 20 世纪 70 年代以来发表了一系列文章和著作，将欧洲景观生态学的起源、背景、历史及其主要论点作了系统的总结和发展。在第一部较为有影响的景观生态学英文教科书中 Naveh 和 Lieberman(1984)继承并进一步发展了欧洲景观生态学的概念，提出“景观生态学是基于系统论、控制论和生态系统学之上的跨学科的生态地理科学，是整体人类生态系统科学的一个分支”。欧洲景观生态学的一个重要特点是强调整体论和生物控制论观点，并以人类活动频繁的景观系统为主要研究对象。因此，景观生态学在欧洲一直与土地和景观的规划管理、保护和恢复密切相联系。

在北美，景观生态学直到 20 世纪 80 年代初才开始逐渐兴起。美国生态学家 Forman 通过一系列文章介绍了欧洲景观生态学的一些概念，并强调景观生态学是不同于其他生态学科的、着重于研究较大尺度上不同生态系统的空间格局和相互关系的学科，提出了“镶嵌体-廊道-基质”模式。与此同时，Burgess 和 Sharpe (1981)合编的《人类主导的景观中的森林岛动态》一书，突出了岛屿生物地理学理论在研究景观镶嵌体中的作用，堪称为北美最早的景观生态学专著之一。1983 年在美国伊利诺州的 Allerton 公园召开的景观生态学研讨会，是北美景观生态学发展过程中的一个重要里程碑。这次会议就当时景观生态学发展现状和存在的问题进行了分析，提出了强调空间异质性和尺度的景观生态学定义，而且对景观生态学的研究内容和方法作了较为系统的阐述。Allerton 研讨会对北美景观生态学发展的方向和进程起到了重要的指导作用。

景观生态学在我国虽然起步较晚，但近年来的发展还是引人注目的。不仅已有不少介绍景观生态学概念和方法的文章和书籍出现，而且有关城市景观、农业景观、景观模型等方面的研究论文陆续发表。然而，从总体来讲，我国景观生态学尚缺乏系统的，跨尺度的理论和实际研究，景观生态学人才亟待培养。今后，景观生态学的发展方向，应强调景观生态设计，这是有广阔前景的。21 世纪是环境建设的世纪，景观生态设计会大有用武之地。例如在我国温带亚湿润地区的沙地的利用上，常发生农林争地、农牧争地的矛盾，按景观生态设计的思想，建设林草田复合生态系统，周围是林网，沿林带种沙打旺(*Astragalus* spp.)等草地，中间种田，可使林、草、田各得其所，互相促进，既可使沙地得到治理，又能从沙地上获取物质财富。我国亚热带石灰岩低山、丘陵的森林遭受破坏后，往往形成草山、草丘，生产力低下，按景观生态设计思想，选择那些易于在石灰岩薄风化壳上生长的豆科灌木，例如在北亚热带可种胡枝子(*Lespedeza bicolor*)和紫穗槐(*Amorpha fruticoso*)等，在中、南亚热带可种银合欢(*Lcuvacna glauca*)、猪屎豆(*Crotolaria mueronato*)等，可迅速绿化荒山，取得良好的生态效益；再将这些豆科灌木的枝条粉碎成草粉，又是粗蛋白质含量很高的饲料，可圈养鸡、鹅、鸭、兔、牛和羊等，发展畜牧业；将积累的有机肥还田，还可把农、林、牧有机地结合起来，短期内就可获得经济效益。我国华北和东北的林缘附近，也是景观生态破坏严重的地区，分布有许多荒山、荒丘。这里的景观生态建设，第一步应该种植豆科灌木等，通过生物调节作用，改善生境条件；第二步再按等高线将乔木与灌木间作，建成乔、灌结合的复合生态系统。这样通过将灌木粉碎成草粉发展饲料工业的办法取得短期内的经济效益，可很快建成灌木林-饲料工业-畜牧业-食品业的生态经济系统。这不仅能迅速绿化荒山，还可将近期效益与长远效益结合起来，既建设生态环境又发展经济(景贵和　1990)。可见，景观生态学在我国必将发挥越来越大的作用。

第二节　景观的结构、功能及动态

在景观尺度上，每一个独立的生态系统(或景观单元)可看做是一个宽广的镶嵌体，狭窄的廊道或是背景基质。生态学对象如动物、植物、生物量、热能、水和矿质营养等在景观单元间是异质分布的。景观单元在大小、形状、数目、类型和结构方面又是反复变化的，决定这些空间分布的是景观结构。在镶嵌体、廊道和基质中的物质、能量和物种的分布方面，景观是异质的和具有不同结构的。生态对象在景观单元间连续运动或流动，决定这些流动或景观单元间相互作用的是景观功能，在景观结构单元中，物质流、能流和物种流的差异表现出景观功能的不同(许慧，王家骥　1993)。

一、景观的结构

景观是由景观要素组成的。景观要素(或称景观结构组分)是地面上相对同质的生态要素或单元。按照各种景观要素在景观中的地位和形状，我们可将景观要素分成三种类型：① 镶嵌体(patch)：在外貌上与周围地区(背景)有所不同的一块非线性地表区域；② 廊道(corridor)：与背景有所区别的一条带状土地；③ 基质(matrix)：范围广，连接

度最高并且在景观功能上起着优势作用的景观要素类型。可见，镶嵌体与廊道在形状和功能上有区别，但也有一致的地方，可以说廊道即是带状镶嵌体。镶嵌体和廊道是与背景相对应的。也可以说，镶嵌体和廊道都是被背景所包围。

(一) 镶　嵌　体

1. 镶嵌体的类型

按照起源，可将镶嵌体分为四类：干扰镶嵌体、残余镶嵌体、环境资源镶嵌体和引入镶嵌体。

1) 干扰镶嵌体(disturbance patch)。在一个背景内发生局部干扰，就可能形成一个干扰镶嵌体。例如飓风、冰雹、雪崩、泥石流、虫害、哺乳动物的践踏、食草动物的取食及人类的活动如对森林砍伐、垦荒、围田、采矿等等都可以造成干扰镶嵌体。 干扰是引起生态系统格局显著偏离其常态的事件。干扰可以是来源于内在因素，例如森林镶嵌体中树木枯死倒下而产生的局部干扰(开林窗)，也可以是外部因素引起的干扰，例如强烈的火灾或风灾。外部干扰有时与内部干扰共同起作用，例如风刮倒了衰弱或枯死的树木。外部干扰还显著地影响生物个体、种群、生态系统，甚至景观的各种各样过程，是造成景观异质性的原因之一。一个地区受干扰后。首先是一些生物个体受危害而死亡，种群数量迅速下降，有的种群在该镶嵌体中灭绝了，有的残存着很少数量，还有的以种子、 卵、孢子的形式进入休眠状态；接着而来的第二个反应是幸存种群大小发生了变化，有些残存种的数量急剧上升，而有些残存种则趋向消亡；第三个反应是镶嵌体中迁入了一些原来没有的种群。干扰镶嵌体是物种消失最快的镶嵌体，干扰镶嵌体经过一段时间的演替，可能变得与周围基质难以区别而消失，但这类镶嵌体也可以在反复出现的长期干扰下形成，如长期经受空气污染，这种情况下受干扰发生的演替过程反复受到阻碍而重新开始，结果镶嵌体内保持一定的稳定性。这类镶嵌体可以保持较长时间(图 15-2)。长期干扰镶嵌体多是人为干扰形成，也有自然原因的干扰，如有规律的洪水，干旱等等，镶嵌体中的生物物种适应了这种干扰，产生了有独特环境或资源的镶嵌体，它与周围基质不同，而又与其保持平衡状态。

2) 残存镶嵌体(remnant patch)。是由包围着一小块未受干扰地区的大范围干扰造成的。被大火漏过的植被地段就是一个例子。也有动物残存镶嵌体，例如足以使周围鸟类灭绝的寒冷气候条件下幸存的在暖坡筑巢的鸟类群落。残存镶嵌体某些特征与干扰镶嵌体类似，它们都是由于人为和自然干扰产生，最初生物种群数量发生变化，接着发生演替，最终与基质融合等。但残存镶嵌体也有自己的特点，例如洪水包围的小岛，一旦岛屿形成，某些种群灭绝速率升高，这段时期被称作“松弛期”，灭绝的种群往往是数量小或者需要较大领地的生物种。然后进入调整期，特点是种群变动速率升高。基质受干扰后，一些物种迁入残存镶嵌体，基质在演替中也经历着种群的迅速变化过程。松弛期之后先是迁入超过灭绝(已消灭的种重新涌入)，后来是灭绝超过迁入(最初的侵入种消失了)，这样交替下去，最后镶嵌体与基质融合，这种情况提醒我们注意，由于在松弛期消失了一些物种，所以残存镶嵌体与基质融合形成的新的生态系统，只是一个物种贫乏

的原来生态系统的仿制品。残存镶嵌体也可以由长期干扰产生，比如大片农田中保留下一块原生林地。长期残存镶嵌体有更长的松弛期和更多的物种消失，它与基质会合后形成的新景观与干扰前的景观可能完全不同。

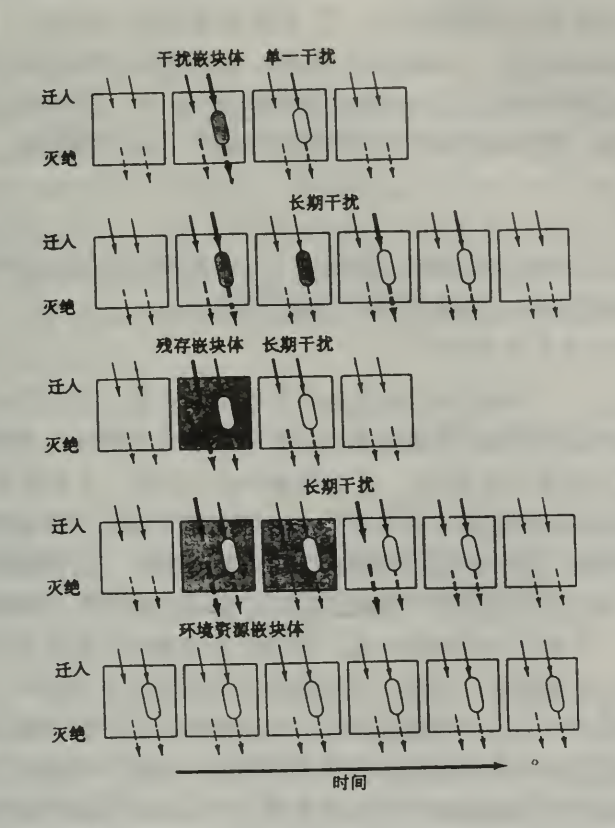


图 15-2　不同起源嵌块体的物种迁人和灭绝(Forman and Gordan　1990)
正方形表示含有椭圆嵌块体的基质地区，阴影表示受干扰区，实线箭头表示物种迁人，虚线箭头表示物种灭绝，箭头粗细表示所估计的物种迁人或灭绝速率相对大小

3) 环境资源镶嵌体(environmental resource patch)。是由于环境资源的空间异质性或镶嵌分布而引起的。例如冰川活动留下的泥炭地，沙漠中的绿洲等等。它们都是由于环境条件或镶嵌体资源不同，镶嵌体中的生物也不同于周围基质。由于资源的分布时期较长，镶嵌体的寿命也较长，周转速率很低，种群数量波动小，不存在松弛期与调整期。与前两类镶嵌体不同，使镶嵌体和基质分开的群落交错区或重叠区往往不分明，可能很宽，形成一个逐步变化的梯度。

4) 引进镶嵌体(introduced patch)。当人类将生物引进一个地区，就产生了引进镶嵌体。它有点类似干扰产生的小面积镶嵌体(林窗上出现新的群落)，新引进的物种，包括动植物和人，都对镶嵌体不断施加着重要影响。这类镶嵌体是地球上存在最为广泛的镶嵌体。最常见的引进镶嵌体有两种：① 种植镶嵌体，是由人引进植物的镶嵌体如小麦田、水稻田、人工林等。种植镶嵌体中物种的动态主要取决于人类的维护管理。如果不进行管理，基质的物种将侵入，并发生演替，最终镶嵌体消失。世界上大多数地区的

种植镶嵌体可维持数十年，甚至几个世纪。种植镶嵌体的动态变化包括一个伴随着干扰和种植而发生的显著变化的短暂初级阶段，和一个在维护活动期间相对稳定的较长阶段，然后是被废弃和演替期间的有重大变化的短暂阶段，最终镶嵌体与基质融合。引进的动物镶嵌体也会发生上述相同过程。② 聚居地镶嵌体，是受人干扰的景观中最显著并无处不在的景观成分之一，包括房子、院落，农用建筑和毗邻的周围环境。聚居地是人造的镶嵌体，它的存在取决于人的维护程度和持续时间，聚居地生态系统典型的不稳定性反映了这两点。聚居地镶嵌体和种植镶嵌体都属于引进镶嵌体。

2. 镶嵌体的大小

镶嵌体最容易识别的特征是它的面积大小。大的镶嵌体与小的镶嵌体显著不同，这不仅涉及物种之间的差异，也涉及能量与物质的差异。

(1) 面积对能量和养分的影响

一般的情况是，一个镶嵌体中能量和矿物营养的总量与其面积成正比，即大的镶嵌体含有的能量和矿物营养比小的镶嵌体多。但也有例外的情况，当我们勘察一个残存镶嵌体(例如被田野包围着的林地)时，从边缘地带进入内部，会发现边缘的植被密度高于内部，其单位面积的生物量高。原因可能是高效利用了阳光，以及边缘地带的开敞性减少了植物的竞争所致。这种边缘植物有些(如树)往往较矮，主杆扭曲分叉，因之产量(如林产品)并不高；而有些产量高于内部(如麦田)，呈现边缘优势。脊椎动物在其镶嵌体中的分布也不均衡，许多野生动物如野兔、野鸡在边缘地带的密度高于内部，食草与食肉动物也经常出没在边缘地带，因此，边缘动物的生物量也高于内部，这是野生动物管理中十分重要的原理。不过，大的镶嵌体比小的镶嵌体有更多的脊椎动物种类，食物链也更长，因为高营养级的种类对镶嵌体的大小最敏感。因此一个拥有许多大镶嵌体、并且环绕小镶嵌体和廊道的边缘地带特别长的景观，将是拥有敏感的内部种和边缘种的野生生物宝库。由于边缘地带植被密度高于内部，因此植物中的营养也可能高于内部地带，而土壤中的养分则可能高于或者低于内部的土壤。由于一个小镶嵌体的边缘面积比率高于大镶嵌体，因此小镶嵌体单位面积的能量与物质不同于大的镶嵌体。

(2) 面积对物种的影响

1）岛屿。在生物群落里，物种的多样性随岛屿面积的增加而增加，即 $S=CA^z$，S 代表多样性，A 是面积，C 是比例常数，参数 z 是 $\log A$ 对 $\log S$ 回归线的斜率，代表值是 0.18~0.35。对 S 与 A 以及 z 值的分析表明，大致的规律是面积增加 10 倍，物种增加 2 倍，面积增加 100 倍，物种增加 4 倍，面积增加 1000 倍，物种的数量增加 8 倍，即面积每增加 10 倍，所含的物种数量成 2 的幂函数增加，2 是个平均值，其通常数值在 1.4~3.0 范围内。这种关系的另一层含义表明，如果一个原生生态系统保存 10%的面积，将有 50%的物种保存下来。如果仅保存 1%的面积，则会有 25%的物种最终被保存下来。可是，这个简单的方程还无法解释物种丰富度机理。麦克阿瑟和威尔逊在 1967 年创立了岛屿生物地理学理论，认为岛屿种的多样性取决于物种的迁入率和灭绝率，而迁入率和灭绝率与岛屿的面积、隔离程度及年龄有关。许多研究表明面积和隔离程度是最主要的因素，物种多样性 S 与岛屿特征有如下函数(f)关系，其重要性按顺序排列：

$$S=f(+生境多样性-干扰+面积-隔离程度+年龄)$$

式中：+表示正相关，–表示负相关。

2）陆地景观。陆地景观中的镶嵌体与岛屿有许多不同，镶嵌体的边界并不都是明确的，有些边界呈现梯度变化，这种状况更能吸引动物在镶嵌体与基质间运动。同一镶嵌体对有些物种来说像岛屿，对另一些种来说又不是。如热带草原上的大型有蹄动物遇到了热带森林，这森林对它们是一种阻隔，而对昆虫和鸟类来说却不是。陆地上的基质与辽阔的海洋相比面积小多了，有相当高的异质性，所以基质可以作为许多动物在镶嵌体间运动的中继站，这样岛屿生物地理理论中隔离程度的重要性降低了。而陆地景观中镶嵌体的物种多样性与镶嵌体的特征与过程有关，镶嵌体的物种多样性与下列顺序的镶嵌体特征有关(与岛屿模式对比)：

$$S=f[+生境多样性-(+)干扰+面积+年龄+基质异质性-隔离程度-边界不连续性]$$

从公式可见，物种差异与镶嵌体面积显著相关。所以在自然保护区设计时，对于维护高数量的物种，维持稀有种、濒危种以及生态系统的稳定，保护区的面积是最重要的因素，而隔离程度、年龄、形状，干扰状况等其他因素被视为是第二位的。

3. 镶嵌体形状

镶嵌体的形状是与面积同样重要的特征。例如当动物四处去寻找食物时，镶嵌体的形状很重要。在昆虫、鸟类或脊椎动物穿越树林时，更容易发现垂直于运动方向上的长而窄的林中空地，而遗漏了平行方向和圆形的林中空地。动物领地范围一般是细长的。湖泊的形状同样具有重要意义，因为湖岸线是影响湖泊生产效率和生物生存的重要因素，因此，湖岸线的发育等级 D 是湖岸线长度 L 与相同面积 A 的圆周长之比：

$$D=\frac{L}{2\sqrt{\pi A}}$$

边缘是指两个不同的生态系统相交而形成的狭窄地区。镶嵌体的边缘部分有不同于内部的物种组成和丰度，这就是通常所说的边缘效应。边缘效应是造成不同形状的镶嵌体中生态学差异的最重要原因。由于许多典型的物种被限制在边缘环境或者内部环境之中，因此，调查镶嵌体的内部面积与边缘面积的比率对了解物种多样性有重要意义。这个比率是描述边缘效应的重要参数。在相同的面积条件下，内部面积与边缘面积之比说明了形状上的意义，即圆形的大于矩形的，细长镶嵌体的这一比率最低。

边缘宽度是镶嵌体的重要性状。边缘的宽度与太阳照射的角度密切相关，镶嵌体向赤道一面的边缘比向极地一面的边缘宽，温带地区的边缘比热带宽。风引起的干旱和养分流通对边缘宽度也有重大影响，在活动期或生长期，主导风向造成更宽的边缘。

对美国新泽西州谷物-豆类农业景观中老橡树林地鸟类和树种多样性的研究证明了上述理论。在 1.5hm^2 面积范围内，树种的多样性随面积增加而增加，1.5hm^2 以上面积，增长趋势减缓，因为没有任何一个树种是被限制在特定的林地范围之内。而鸟类的

多样性要到 4.0hm^2 时才显著增长，这是因为有一半鸟类依赖于林地大小。1.5hm^2 以上的镶嵌体，内部与边缘面积近乎相等，随着镶嵌体面积增加，边缘的鸟很少增加，而内部的鸟却不断增加。这个研究例子说明了大镶嵌体有特殊的重要价值，因为大镶嵌体拥有敏感的内部种和更多的珍稀物种。除了带状镶嵌体以外，还有一些特殊形状的镶嵌体，例如环状镶嵌体和半岛，其内部与边缘的比率比相同面积的圆形要低得多，因而也含有少得多的内部种。环状镶嵌体中最典型的是山地，例如两栖动物聚集在池塘周围、不同海拔高度上分布着植被带等。环状带是被拉长的镶嵌体，内部与边缘比率很低，因而内部种很少。至于半岛，它是镶嵌体的狭窄延伸部分。矩形镶嵌体的一个角也往往表现半岛的功能。半岛的物种多样性常低于大陆，而且从底边到顶端，物种多样性逐渐降低。其原因还不清楚，有各种假说，例如侵入—灭绝假说，内部与边缘比假说，等等。也有从底边到顶端物种多样性不变的例子。墨西哥加利福尼亚的脊椎动物调查证明，从北到南(顶端)，蝙蝠类上升 19%，蜥蜴保持不变，啮齿动物下降了 75%。半岛的气候往往受周围基质(如水环境)的影响而改变。例如在寒冷地区，由于半岛气候被水环境改善，无霜期延长，所以果树只能种植在半岛上。

4. 镶嵌体的构型

以上我们讨论了单个镶嵌体的特性，但景观中的镶嵌体并不是单个的，而是大量的。景观中的镶嵌体一般都存在四个方面的特征：① 每种群落类型的镶嵌体数目；② 每一个镶嵌体的产生机理；③ 每一个镶嵌体的大小；④ 每一个镶嵌体的形状。然而， 只了解这四个方面的情况还不够，我们不能忽视镶嵌体群在景观空间的排布情况，它们的空间分布对能量、物种的流动有重要影响。如果距离很远，这样的交往和相互干扰就会大大减少了。同样，对镶嵌体群来讲，如果个体之间相距远，则相互干扰少，相反，则干扰很容易发生。但是，在同类型的镶嵌体中间有其他类型镶嵌体分布时，例如林地镶嵌体之间有沼泽镶嵌体时，沼泽镶嵌体可以成为林地镶嵌体之间相互干扰的障碍。可见，镶嵌体的空间构型对干扰有重要作用。

从干扰与镶嵌体的相互关系中可以得出这样一个有趣的结论，镶嵌体越多，干扰越容易扩展，干扰的扩展使镶嵌体减少；镶嵌体越减少，干扰越不易扩展，镶嵌体就得到发育而增多，干扰又变得容易扩展，如此循环形成一个负反馈系统。当镶嵌体密度和干扰等级都在一定范围内振荡，系统就稳定下来。景观稳定性是一个重要问题，反馈系统对景观结构特征的影响是极其重要的。

(二) 廊　　道

廊道是指不同于两侧基质的狭长地带，可以看做是一个线状或带状的镶嵌体。廊道可以是一个孤立的带，但经常与有相似组分的镶嵌体(至少在一端)相连。

1. 廊道的作用

廊道有着双重的性质：一方面它将景观不同部分隔离开，另一方面它又将景观其他

不同部分连接起来。这两方面的性质是矛盾的，但却集中于一体，不过，区别点在于起作用的对象不同而已。例如一条铁路或公路可将相距甚远的甲、乙两地连接起来，但如果你要垂直地穿越它，它却成为一个障碍物。廊道起着运输、保护、资源和观赏的作用。运输作用是显而易见的。公路、铁路和运河是人和货物在一个景观中移动的通路。人行小道可以便于人们从一个村走到另一个村。兽道是野生动物移动的通路。能量沿电线和输气管道运输。

廊道对于被它隔开的景观要素又是一种障碍物，并从而可起某种保护作用。中国的万里长城就是一种专门为抵御外来侵略而修建的人工廊道，今天则成为举世闻名的世界奇观。在今天的中国，各种单位和团体一般也要修一个围墙，以使本单位与周围地区隔离开来，从而保障本身的安全。带状的防护林可保护农田免受风沙之害。溪流两旁的河岸植被可保护河岸，同时，也可防止两侧水流将沙泥带到河水中去。

廊道本身也是一种资源。有一些廊道地带，野生动物特别丰富，并且是食用肉的来源。树篱也可提供很多产品，如燃料、饲料、用材和果品等。廊道在景观的美学中起着重要的作用。我国传统园林中讲究“曲径通幽”，指的是要把园林中的观赏路径设计成为弯曲的形状，以便使一些景点藏在幽静之处，并从而使人感到有出乎意料之外的效果。公园中也有一些人工建筑的廊道，如颐和园昆明湖东侧的长廊，就有很高的艺术价值， 一方面，它把颐和园北部和南部连接起来，另一方面在这个廊道中前进时，既可俯视昆明湖的宽广湖面，又可仰观万寿山的起伏山峦和佛香阁等金碧辉煌的建筑。杭州西湖的苏堤，长 2.8km，是西湖上的一条彩带，它既是著名的廊道式风景点，也是连接南北两山的重要通道。

2. 廊道的类型

按起源可将廊道分为干扰廊道、残余廊道、环境资源廊道和种植廊道等。干扰廊道是由于带状干扰造成的。如在森林中带状地砍伐森林，即为干扰廊道。如将一片森林均伐光，只剩下一条带状树木，它即是残余廊道。环境资源廊道是由于异质性的环境资源在空间的线状分布而产生的，例如河流就是水资源的分布所成，河流两岸的植被带，多由杨柳组成，显著地与相邻的高地植被不同。山脊动物小道也常具有特殊的生境和植被。种植廊道更加普遍，如行道树、农田防护林等。各种廊道的持久性与其成因有密切关系。环境资源廊道一般具有相对的持久性。干扰廊道和残余廊道变化较快，它要受因干扰所发生的植被演替过程所控制。种植廊道的持久性完全决定于人类的经营管理活动，一旦这种活动停止，种植廊道不可能继续存在。

3. 廊道的结构

廊道最重要的特征之一是它的弯曲度或通直度。例如有的河流在山区比较通直，而在平地则变得蜿蜒弯曲。可以用一段廊道中两点间的实际距离与它们之间的直线距离之比来表示弯曲度。廊道越通直，景观中两点间的实际距离越短，物体或动体在廊道中移动得越快。但这显然不是越直越好。例如对旅行者来说，爬山时，可能有好几条路可供选择：有的路距离近，但坡陡路滑，爬起来很费力气；有的路距离远，走起路来不太费劲，但要走很长的时间；还有的路介乎两者之间。

廊道另一个重要的特征是它的连接性。它以廊道单位长度中裂口的多少来表示。无论从管道功能和障碍功能来说，连接度均是很重要的。对有的廊道来说，不允许出现裂口，否则就完不成管道作用或障碍作用。例如一个河流要是开了口子，它的功能就会丧失或造成巨大灾害。对有的廊道来说，如农田防护林带，有时裂口是必然要有的(如为了通行)，但也会妨碍该廊道的整体功能。

廊道的宽度不是固定不变的，而这一点会影响到物种的移动。类似地峡一样，我们可将廊道中的狭窄处称之为狭点。两个廊道相连接处或一个廊道与一个镶嵌体相连处， 也有特殊的生物学意义，我们可将其称之为结点。

从廊道的横断面来看，可分为一个中央区和两个边缘区。两个边缘区可能很类似， 也可能有某种差别，这决定于廊道的宽度以及周围的性质。按照廊道的宽度以及边缘区和中心区的情况，可将廊道分为线状廊道和带状廊道。前者以边缘种占优势，较狭窄，后者内部种占一定比重，较宽。

从廊道与周围景观要素的垂直高度来看，可分为低位廊道和高位廊道。凡廊道植被低于周围植被者(如林间小路)属于前者。凡廊道植被高于周围植被者(如农田防护林带)属于后者。

(三) 基　　质

1. 基质的标准

一个景观是由几种类型的景观要素构成的。其中，基质是占面积最大，连接度最强，对景观的功能起的作用也最大的那种景观要素。尽管镶嵌体和基质在概念上很容易弄清楚，但实质上有很多困难。为此，提出区分基质和镶嵌体的三条标准，即相对面积、连接度和动态控制作用。

当一种景观要素类型在一个景观中占的面积最广时，即应该认为它是该景观的基质。一般来说，基质的面积应超过所有任何其他类型的总和，或者说，应占总面积的50%以上。如果面积在 50%以下，就应考虑其他标准。

区分基质的第二个指标是连接性。关于连接性，在这里指的是：如果一个空间不被两端与该空间的周界相接的边界隔开，则认为该空间是连通的。这正如一座房子，里面虽然分了几间屋子，互相也有墙，但各个屋子间有过道相通，这时还认为它是相通的。 一个连接性高的景观类型有下述几方面的作用：① 这个景观类型可以作为一个障碍物，将其他要素分隔开。例如一个林带可将两边农田隔离开，在林中设防火林带可将两边森林隔开。这种障碍物可起物理、化学和生物的障碍作用(如妨碍昆虫和种子流动)。② 当这种连接性是以相互交叉带状形式实现时，就可形成网状廊道，这既便于物种的迁移，也便于种内不同个体或种群间的基因交换。③ 这种网状廊道对于被包围的其他要素来说，则使它们成为被包围的生境岛。当一个景观中发生这种隔离时，有些动物(如鼠类、 蝴蝶等)的种群会产生遗传分化。由于以上这些效果，当一个景观要素完全连通并将其他要素包围时，则可将它视为基质。当然，基质也不是完全连通的，也可能分成若干块。对动态的控制作用是区分基质的第三条标准。例如以树篱和农田来说，树

篱中的乔木树种的果实、种子可被动物或风等媒介传到农田中去，从而使农田在失去人的管理之后不久就会变成森林群落。这样就表现出树篱对景观动态的控制作用。又如在森林地区，和原始森林相比，采伐迹地和火烧迹地是不稳定的，它们内部乔木树种的更新和恢复，要靠周围森林供应种源并给予其他方面的有利影响。所以，原始森林应为基质，而采伐迹地和火烧迹地应为镶嵌体。不过，当采伐迹地或火烧迹地面积很大时，森林常常岛状分布，那时，它就起不了它应起的作用了。一般来说，当把几种植物群落相比时，先锋群落一般不稳定，而顶极群落或称地带性群落比较稳定，如果其他条件相同，顶极群落控制动态发展的能力更强。

如何对上述标准做出综合考虑呢?从判断难易说，相对面积最易估计，动态控制最难估计，而连接性介乎中间。在实际工作中，首先应该对一个景观计算其相对面积和连接性水平，如果某一景观要素的面积远远超过任何其他要素，我们可以称它为基质。如果有几个景观类型所占面积类似，则可将连接性最高的要素类型视为基质。如果根据上述两个标准还不能做出决定，则必须进行野外调查，研究植物种类成分以及它们的生活史特征，估计哪个要素对景观动态的控制作用更大些。

2. 景观基质的孔性

孔性(porosity)和连接性二者均是描述基质特征的重要指标。镶嵌体在基质中即是所谓孔。所以镶嵌体密度和孔性有密切联系，不过，计算孔性时只计算有闭合边界的，没有闭合边界的镶嵌体则不算数。连接性可分为连接完全和连接不完全。不管基质中有多少个“孔”，但如基质能相互连通，则称连接完全，否则称之为连接不完全。所以多孔性与连接性是完全无关的概念。

孔隙度是景观镶嵌体密度的量度。评价基质孔隙度水平，只要简单地计算现有镶嵌体数，即包括在基质内的单位面积的闭合边界的数目(图 15-3)。闭合边界(如圆形和多边形)不接触所研究空间或景观的周界，而开阔边界两端都与周界相交。

在最简单的情况下，只有一条边界穿越所研究的景观，边界的两端与周界相交图[15-3(a)]。此时孔隙度为零。如果只有一个闭合边界，那么环绕的景观要素通常就是基质，镶嵌体也就包含在基质内图[15-3(b)]。环绕的景观要素不一定总是基质，这两种景观要素的物种组成对确定基质具有重要作用。然而，其他情况大体相同，例如，很有可能的是，周围景观要素对内部景观要素的演替动态具有控制作用；反之亦然。

具有闭合边界的镶嵌体数量越大，基质的孔隙就越多。图 15-3 中的(b)~(e)图描述的基质分别为 1、2、3 和 11 个孔隙。这些实例都表明，孔隙度是一个与连接度无关的概念。在这 4 种情况下，基质的连接度保持不变，而孔隙度变化为 1~11(现在可看出为什么要用更精确的标准来表示基质的特征)。当研究地区为开阔边界和闭合边界所贯穿时，边界区分更为困难图[15-3(f)]。在这种情况下，分别估算连接度和孔度是非常必要的。图 15-3 中的(g)和(h)表明孔隙度不变时连接度水平如何变化。在这两种情况下，孔隙度都为 2，但连接度只能在图 15-3(b)中直接看到[最好了解图 15-3(g)中：未连接的基质部分是否在观测图之外连接。对这一难题的惟一解决办法就是扩大研究范围，但这种途径实际上是行不通的，因为只有观察整个地球表面才能解决这一问题]。

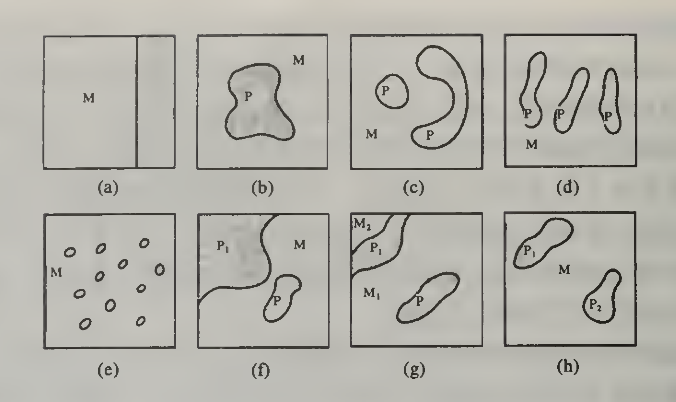


图 15-3　基质的孔隙度和连接度(Forman and Gordan　1990)

M=基质，P=镶嵌体；(a) 最简单的情况，孔隙度为 0；(b) 孔隙度为 1；(c) 孔隙度为 2；
(d) 孔隙度为 3；(e) 孔隙度为 11；(f) 孔隙度为 2，基质连接完全，
但 M 和 P 何为基质尚不清楚；(g) 孔隙度为 2，但连接不完全；(h) 孔隙度为 2，连接完全

孔性这个指标的生态意义在于：① 它在一定程度上表明基质中不同镶嵌体的隔离程度，而隔离程度影响到动植物种的基因交换，并进一步影响到它们的遗传分化；② 它也可说明边缘效应，而边缘多少与动植物的分布和生存有一定关系；孔性低说明基质中的环境受镶嵌体影响少，这对某些动物生存至关重要，可是基质中的镶嵌体对另外一些种的觅食和其他活动，也是至关重要的。

人对森林的采伐(例如皆伐)在原始林中创造不少孔。这种采伐活动(如伐区大小和伐区配置)对于森林采伐的成本、工艺设计以及森林更新和森林稳定性等均有重要的影响。

Franklin 和 Forman 采用模拟的办法，研究了森林采伐所造成的孔性以及因此而引起的生态学后果。模型设计了六种采伐办法(其中三种是交错分布，但采伐块和保留块所占比例不同，另外三种是单中心往外采伐、四中心采伐、平行进展采伐)，用以描述景观格局的主要指标有镶嵌体大小、边缘长度、分布格局、森林覆盖率。分析生物学后果主要集中于森林受火和风倒干扰的可能性、种的多样性、狩猎种群的变动等。根据研究，Franklin 提出的建议包括三点：① 过去，美国西北部花旗松林区主要采用交互块状配置伐区，现在看来，这种方式太分散，造成的边缘太长，容易造成风倒和火烧的危险，应该改变为顺序前进的采伐方式，这种方式对森林干扰轻，有利于生物学多样性的维持；② 要保留大块的原始林作为保护区，其目的是维持内部种的生存和森林的美学价值；③ 处于残存片林之间连接廊道，对于景观保护至关重要，应予以保护。

(四) 网　　络

关于廊道已在前面叙述，但是廊道如互相交叉相连，则成为网络。网络是基质的一种特殊形式。许多景观要素，如道路、沟渠、防护林带、树篱等均可形成网络，但代表性最强的是树篱(包括人工营造林带)。网络在结构上的重要特点有交点和网格大小等。

1. 交点

一个网络中不同廊道之间的交点是各种各样的，可分为“十”字型、T 型、L 型以及与林地相交的交点。网络并不一定是完全连通的，可能包括一些间断的裂口。交点处及附近的环境条件与网络上的其他部位有所不同。例如以树篱为例，围绕交点的小片地区风速较低，日光少，土壤和空气湿度较大，土壤有机质含量较高，温度变化较小。这些环境条件的特殊性，导致在天然树篱的交点处，草本植物种的多样性，比网络中其他部位明显的高。

2. 网格大小

网格内景观要素的大小、形状、环境条件以及人类活动等特征对网络本身有重要影响，相反地，网络又对被包围的景观要素给予影响。在这种相互作用中，网格大小起着重要作用。这里要强调的是所谓网格大小可以网线间的平均距离或网格内的平均面积来表示。

网格大小有重要的生态和经济意义。研究网格大小与物种粒度的关系特别重要(Levins 1968)，即物种在完成其功能，如觅食、保护巢穴领地或吸收阳光和水分时，对网络线间的平均距离或面积相当敏感。例如，在法国布列塔尼地区景观中，食肉性甲虫—粒度较小的物种，在农田网格平均面积大于 4hm^2 时则会消失(图 15-4)(Deveacaux 1976)。相反，粒度较大的物种，如猫头鹰，通常在网格大小为 7 hm^2 时才会消失(Leduc 1979)。

农田林网的网格密度也是一个重要问题。网格密度越大，越不利于农田的耕作，同时，当林带宽度相同时，网格密度显然也影响到林网与农田所占的比例。此外，网格大小显然与被保护的农田的环境变化进而与农田的产量也有密切的联系。

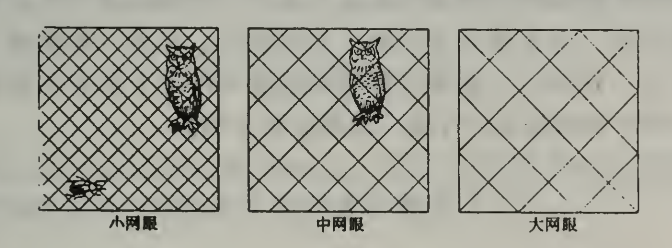


图 15-4 与网格网眼大小相关的粒度大小(Forman and Gordan 1990)
网格越大，网格内物种的食物或其他资源就越少，
相反网格内空间的物种特征随着网格变小而消失

二、景观的功能

(一) 景 观 的 流

通过景观的流有三种：① 能量流(包括热能和生物能)；② 养分流(包括无机物质、有机物质和水)；③ 物种流(包括各种类型的动植物以及遗传基因)。当这些“流”

超常量流动时，就会成为一种干扰因素，导致景观中生态系统或者生物群落发生变化。

导致景观元素之间相互作用的五种机制是：① 风。它携带水分、灰尘、气溶胶、雪、种子、小昆虫以及热量等等。② 水。包括雨、冰、地表径流、地下水、河流、洪水等，能够携带矿物养分、种子、昆虫、垃圾和有毒物质。③ 飞行动物。如鸟、蜜蜂、昆虫，它们的翅膀或者脚趾可以携带种子、孢子、昆虫等，它们吃下果子时，肠胃里也携带了种子，并通过粪便传播。④ 地面动物。功能同于飞行动物。⑤ 人。不仅人体本身可以携带各种物质，而且会利用容器、车船等工具将物质带到目的地。此外，果实自身炸裂，散落种子，土壤的下滑移动等也可以导致景观元素间的相互作用。

影响这三种流运动方向和距离的力有三种：① 扩散。这个术语原本是用来描述分子运动的，如从高浓度向低浓度的分子运动。现将该术语的应用范畴拓宽了。扩散在宇宙中到处可见，但在同质性系统中不存在。它是与异质性密切相连的，特别运用于异质性景观功能的分析。一般来说，扩散在自然界中的分布是非随机的，很难找到随机空间格局。扩散与另外两种力相比是一种低能耗过程，在物种小尺度的移动中很重要。② 物质流。物质流是物质沿能量梯度的运动。风是一种重要的物质流，是由于大气中的压力差异而产生，使空气分子从高压向低压运动。作为一种传输媒介，风使轻的物体如昆虫、种子、树叶飘落到附近的景观，进行短距离输送。此外，风还能传输热能，另一种重要的物质流是地表水和地下水在重力作用下的流动，它们携带着营养物质，种子等运动，甚至冲走土壤颗粒造成水土流失和泥石流。③ 移动力。是物体消耗本身能量从一个地方运动到另一个地方。如在微风中飞来飞去采蜜的蜜蜂，乘坐各类交通工具越过景观的人类，等等。推动这些物质运动的力与物质流相同，其能量来自本身(或者消耗了化学能)，是从有机物质中产生的。移动力的最重要的生态学特征是在景观元素中造成高度聚集，如蜜蜂将花蜜采回蜂窝中，新石器时代的人将收集到的野生生物种子种在一小块土地中。在这些例子中，那些散布在景观中的物质被集中在一个景观元素中的一小块地区。另外一种移动力造成的格局是扩散，如猴子在一种果树上采食，在运动过程中将种子散布在各处。在景观的规划和管理中必须评价的流有空气流、地面流和土壤流。

（二）景观元素的相互作用

景观元素之间的相互作用是通过景观的流来实现的，而毗邻景观元素的各自边缘效应对各种流有重要作用。

1. 镶嵌体—基质的相互作用

镶嵌体和基质之间的养分流是相当多样和有意义的。枯枝落叶净养分的流动主要在边缘部分进行，而大量的养分通过风、水和动力机制进入到作为一个整体的两个景观元素之中。镶嵌体和基质的物种流也是多样和广泛的。边缘起了重要作用。风是主要驱动机制之一。例如在美国中西部空气运动研究中，生长在低地的醋栗的锈病孢子被搬运到高地，导致了白松林带的疱疤锈病。

当镶嵌体为栖息地时，如住所、院子、窝穴等，情况就不同，这些流主要从镶嵌体流向基质，驱动机制是人和非原生物种。

2. 镶嵌体之间的相互作用

具有相似群落，而在空间上分离的镶嵌体之间的相互作用主要由生物动力所致，风的作用很小。一般来说，能量和养分的传输不重要，而物种的迁移很重要，尤其是动物中的特有种，可以从一个镶嵌体到另一个镶嵌体觅食。当镶嵌体中发生物种的局部灭绝时，可以从邻近镶嵌体迅速获得补充。

3. 镶嵌体—廊道的相互作用

类似于镶嵌体之间的相互作用。主要的流是物种，由风力等驱动。廊道有利于伴随着镶嵌体内部种局部灭绝后的再迁居，而镶嵌体是廊道的物种流。

4. 廊道与基质的相互作用

线状廊道、带状廊道和河流廊道不但结构与功能不同，而且与围绕的基质的相互作用也不同。基质气候对线状廊道具有主导性影响。此外，大多数作用的方向都是从廊道到基质，如灰尘，车辆污染会从公路进入农田。在线状廊道中繁育的非原生物种会散布到基质中去。廊道对基质的另一个重要作用是隔离种群，从而限制基因的流动。

带状廊道与基质之间的流数量众多，且相互依赖，这是由于宽度效应使带状廊道可以具备许多开阔区域的物种。

河流廊道的重要性很早就被认识到了，尤其是河流廊道与基质的相互作用。水是主要的驱动力，流动的方向基本上只有一个，即从基质流向河流廊道。

可见，三种廊道均在基质控制之下，并对基质依次施加某些重要的作用。

（三）景观的功能

在研究景观元素间的相互作用的基础上，讨论“景观是如何发挥功能的?”主要涉及廊道、基质和镶嵌体的功能特征。

1. 廊道与流

廊道的功能可以概括为四个方面：

1）它是某些物种的栖息地。无论线状廊道还是带状廊道都存在着边缘种，宽的廊道还存在内部种，廊道是有别于基质和镶嵌体的生境，因此廊道上的物种也有别于基质或者镶嵌体。

2）它是物体运动的通道。例如河水沿河道流淌，车辆、行人沿公路运动；动、植物是沿廊道运动的主要物流，如树篱可以帮助动、植物越过景观。当廊道存在时，干扰(如火与虫害)会沿廊道运动，扩大干扰的范围。有时与镶嵌体相连的廊道好似细脖瓶颈，人们在那里可以有效地控制某些干扰继续扩大。

3）屏障或过滤效应。比如人们种植灌木树篱的主要目的是为了保护农田和房舍，

阻止动物侵入。而河流廊道的树林对水分和养分有重要的过滤作用。树篱对某些动物是通道，而对另一些动物则是障碍。例如宽的河流可能是障碍，甚至可以造成两岸狐狸种群差异。宽的廊道有利于沿廊道运动而不利于穿越廊道的运动，窄的廊道则利于穿越而不利于沿廊道的运动。还有一点应引起注意，即廊道结构中的中断，它阻挡了沿廊道运动动物的前进，但对于某些把廊道视为屏障的物体，中断则有利于它们通过景观(图 15-5)。

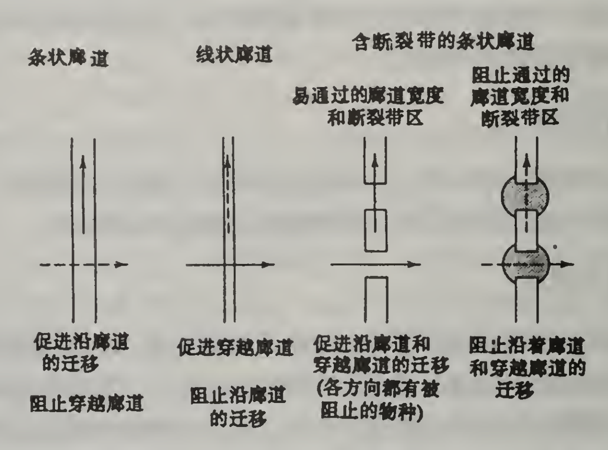


图 15-5　廊道宽度及断开对物种穿越景观的影响(Forman　1983，载 Ekologia CSSR)

阴影区说明对物种迁移的阻止状态，以强调断开区的重要性

4) 廊道还是一个对周围基质产生环境和生物影响的源。例如一条公路穿过田野，它就成为向周围排放尘土、污染物、热能的源。树篱上存在许多田野里所不具有的物种， 甚至是森林的内部种，借助于风和动物的传播也可以散布到田野中去。

廊道的上述四种功能均包括物种流，后两种还包括了能量流和养分流。

2. 基质和流

基质的特征影响着流。

1) 连接性。在连接性高的基质中，不存在或很少存在阻挡物体运动的屏障。空气流形成的风把热量、灰尘和种子带过景观，而火灾和虫害的扩散也不受阻挡。因此人们常在火灾多发区设置防火障，在森林繁育时注意多物种团块式混交。前者是为了降低连接性防止火灾蔓延，后者除具备一定的防火功能外，主要是为了防止虫害扩散。基质的高连接性有利于保护那些不能越过窄廊道的内部种。可以推测，在高连接性的基质中， 运动的平均速度高，缺少屏障基因变化较小，种群差异小。

2) 景观的阻抗。即影响物体运动速度的结构特征，由四种因素造成。其中两个是边界特征：① 穿越边界的频率，由于水、风和移动力造成的运动一般越过边界较慢，所以它们是比较容易测定的指标；② 边界的不连续性，也就是说边界是突变的或是渐变的，都使流的速度改变。突变比渐变的边界对动、植物的运动有更大的阻力。热量流、水流等可以顺利地通过不连续边界。另外的两种因素为：③ 适宜性，即景观元素

是否适合于物体的运动，同一景观元素对不同的物体或物种运动的适宜性等级不同；④每一个景观元素的总长度，这是比较容易测定的。

3) 狭窄地带。物体的运动会受到基质宽度的影响。基质有的地方很窄，物体运动速度会因此发生变化。风和水流经狭窄处，由于有文氏效应，速度会变快。所以在峡谷的出口处风速变大了。相反，当大队人马涌到峡谷时，速度变慢，须滞留较长时间。这说明靠移动力运动的目标遇到狭窄处一般速度变慢。狭窄处犹如一个瓶颈，对于流十分重要，而且正如廊道中的中断一样。狭窄处邻近一小块区域有特殊的意义，应该引起管理和规划者的注意。

4) 孔隙率及镶嵌体间的相互关系。与高连接性相反，高孔隙率基质上有许多镶嵌体，对物体通过基质造成了或大或小的影响。影响的大小取决于流的性质。如果镶嵌体是不宜通过的，例如当食草动物要通过镶嵌体，而那里隐藏着食肉猛兽，这些食草动物就会放慢速度，时走时停，表现不安。如果镶嵌体是适宜于通过的，则高孔隙性的基质适合以跳跃方式通过景观。相似镶嵌体间的相互关系取决于它们之间的距离。对于有些种类的流，镶嵌体的面积对相互间的作用也很重要。

5) 影响范围。是受一个特定结点或镶嵌体影响的区域。影响的强度随与镶嵌体的距离而改变。人口密集的城市中心受影响的范围可能指交通网和污染物影响的区域。对于某一个确定的镶嵌体，其影响范围的大小还随流的种类不同而不同。根据运动物体产生明显影响的距离，应分出高等、中等和低等流。对高等流来说，大结点附近的小结点与大结点相比没有明显的影响。相反，对低等流，即使小结点也能产生较大的影响。对每一种特定类型的流，都可以确定不受影响区。其中，对高、中等流来说，可以没有不受影响地区，而对低等流则存在不受影响地区。用这种方法可以研究物种疏散、裸地上尘土和热量的流动以及污染物的扩散。研究发现，不同的空气污染物影响的范围不同，其中二氧化硫致毒水平的扩散不过 1km，而属高等流的氧化锌可以扩散数公里，致使大面积植被受害。将不同等级流的影响区域画在景观图上，可以直观地反映等级空间结构。

6) 半岛交指状景观的影响。两种元素边缘成交指状连接的格局是景观中常见的，如植被成枝状嵌入河滩，农田与林地交错等。这类景观中，由于有来自两种元素中的物种，因而交指区中部的物种多样性丰富。在狭窄的半岛中物种多属边缘种，内部种主要集中在交指地带两旁的同质地带(图 15-6)。越过这部分景观的物体速度取决于流的方向。如果与指状部分同向，由于越过边界的频率低，则平均速度高，若与指状部分垂直，由于越过边界频率高，则平均速度低。

7) 流的取向。镶嵌体的形状很重要，它影响景观的生态特征和镶嵌体中的物种。造成这种相关性的关键因素在于景观元素的空间结构与流的空间取向间相互作用的角度，镶嵌体的长轴与物流方向平行、垂直或成一定角度。

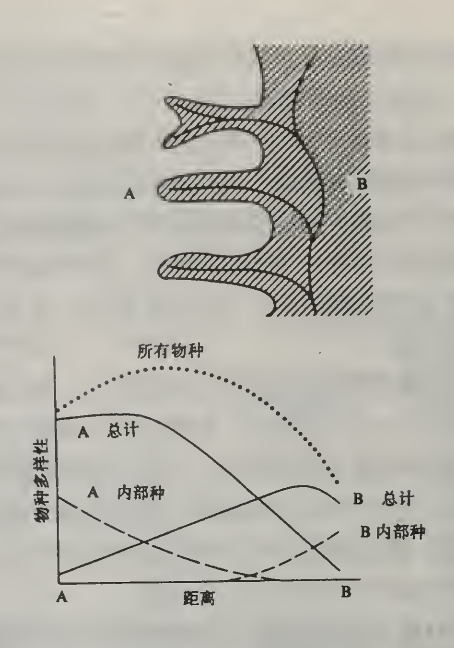


图 15-6　半岛状交错接合及其期望的物种多样性格局(Forman and Gordan　1990)

A 和 B 为两种不同的生态系统，即分别代表高地和低地生态系统。

图为平均物种多样性(种数)，这是根据半岛交错接合区许多水平抽样调查结果得出的。

在这个实例中，假设 A 的多样性比 B 高

8) 距离。在景观生态学中常用的距离概念是时间距离，即以时间单位分、小时、日、月、年来衡量距离的长短。因为两点间直线距离虽然很短，但常有运动障碍，为了找到一条能最快运动的路线，必须进行曲线运动。例如鱼要逆流而上时，它不是直迎水流方向，而是走“之”字路线，能最快达到目的地。同是两点之间，方向不同时最短的路线也不相同，鸟类迎风飞和顺风飞的路线不同就是一个明显的例子。

3. 网络

网络是景观中最常见的和分布最广泛的结构类型。它与各种流的运动密切相关。网络的下列特征对流有重要影响：

(1) 结点的功能

结点对流有两种作用，它是廊道的交接地区和运动物体的源或汇。城镇是高速公路上运动的结点，水塘是荒漠上巨角岩羊运动路线上的结点。廊道互相交连成网，网上的结点类型和大小不同，而且从时间的角度看结点上的物流不是连续的，例如巨角岩羊一天中两次(早晨和黄昏)大量出现在水塘旁，乘车上下班进出城镇的高峰也在一早一晚。

结点往往是运动的中继站而不是最终目的地。中继结点对流施加着 3 种控制作用：① 使流放大或者加速；② 降低流的“噪声”或不相关因素；③ 提供临时贮存地点。野生动物保护区中分离的湖泊对水禽在景观中的迁徙提供了重要的中继结点，在这里可以提供食物(放大)，淘汰较瘦弱的鸟(消除噪声)，可以群聚在这里等待迁飞的好天气(临时

贮存)。这个例子提醒我们，结点的相对位置对于流和结点的利用是很重要的。结点的环线或供选择路线能提高运动的有效性。廊道网络的主要作用是结点的易接近性，即使隔离开的结点或者两个邻近地区也能更容易到达。

(2) 网络的连接性

即系统中所有结点被廊道连接的程度，它是系统复杂还是简单的一个量度指标。

(3) 空间扩散过程

即向外散布过程。在狭义上用它来说明粒子从一个浓度高的区域向一个低浓度区域的运动。这个运动可以是自发的，也可能是由热能推动的。在这里我们讨论的是广义的扩散。如空气团通过大陆，非本地种(如害虫)越过景观等等。某些物体在空间的运动是均匀扩散，也有一些是跳跃式的。这两种形式结合的运动形式是生态界普遍存在的形式。物种从一个结点跳到周围的几个结点上，然后在新的结点上向周围扩散。如果结点的等级是明显的(例如人口集中的大城市到农舍的若干等级)，这个扩散过程则是等级式扩散。我们可以推测，一些最新引进的非本地种从好生境到不适宜生境的分布是等级式扩散。应该指出，方向性是等级式扩散的重要特征。

膨胀扩散与易位扩散之间的差别在景观生态学中也很重要。在膨胀扩散中物体扩大了它们的覆盖面积，并仍然占据它原来的位置。如热量在无风的情况下向周围地区散布，再如树木利用根系繁殖，以自身为中心向四周扩大领地。易位扩散是物体离开一个地方到达了另一个地方。例如山洪从山上流到山下，一群猴子离开了原来的丛林来到另一个食物更丰盛的树林。

可以用数学模型来研究扩散过程，最常用的是研究距离、时间、障碍等因素对流扩散的影响(假设物体运动方向是随机的)。但扩散模拟的假设过于简单，在应用时要谨慎。

(4) 最优化

在网络分析中我们常要寻找两个结点间的最短路线，连线的最好位置或是系统中最重要的连线(如果断裂就会引起重大变化)。所谓最优化就是对系统中某几个事物尽量放大，忽略其他组分，而将大部分组分或因素减少到最小程度。例如在动物选择最优觅食路线的研究中，重点在于使运动路线能搜寻最大的范围和获取最多的食物上。网络最佳路线的分析也是景观规划管理中所需研究的问题。

三、景 观 动 态

景观动态是景观生态学的基本研究对象之一。景观动态包括景观的结构和功能随时间而发生的变化。这种变化既受自然因素的影响，也受人为因素的影响(徐化成1996)。

景观动态有时是一个缓慢的过程，有时则表现为突发性的灾变。1976 年唐山大地震几乎一夜之间改变了唐山的城市景观面貌。1987 年 5 月 6 日至 6 月 2 日，在我国大兴安岭东部地区发生的特大森林火灾，几乎遍及该地区的一半面积，过火面积达 435 万 hm^2。虽然这是两个非常突出的例子，但类似的突变事例并不罕见。在较长时间尺度上

发生的变化也很常见，如农区变成城市，郊区变成工厂，灌溉和水利设施的修建，各种道路的修建，林区森林被砍伐，人工造林，它们都可以使一个地区的景观变成另外一种完全不同的景观。影响整个景观的许多因子可在更长的时间尺度上发生。如演替过程通常可持续几十年到几个世纪，地貌形成过程需要数千年或更长的时间，而主要生物类群的进化则需要经历几百万年。

只有了解过去才能规划将来。我们要对一个地区的景观结构和功能的变化规律做出分析，研究其发展趋势以及其对生产力和环境效益的影响，并在此基础上探索出更能符合人类长远利益要求的发展道路。

(一) 稳　定　性

1. 景观变化曲线

如果不考虑时间尺度，则我们研究稳定性可以从时间变化的典型曲线开始。Forman 和 Gordon(1990)按照下述三个参数来研究曲线的变化特点：① 曲线总趋势：分为水平、上升和下降三种类型；② 围绕总趋势的相对波动大小，分为波动较小和波动较大两类；③ 波动的节律：分规则和不规则两类。把三个参数结合起来，共可划分 12 种类型(图 15-7)。每一个类型用一种代号表示，如 LT-SRO 代表总趋势为水平，波动较小，且有规则；DT-SIO 代表下降趋势，波动较小，且不规则。当然除上述三个参数外，还可附加一些，如波动幅度随时间是增大还是减少，可以采用直观分析的方法来判断我们所研究的某一景观的某一属性(如镶嵌体的形状和大小、廊道宽度、基质孔隙度、网络特征、生物多样性、景观间的流、总生物量等)究竟属于哪一种类型，也可以采用简单的统计方法(如时间序列分析)。在分析步骤上，首先要找出某个属性的观测值是否可用具有某种斜度的直线回归来表示，而回归系数可表示这条直线是水平、上升还是下降的，然后再确定波动幅度的大小以及直线上下观测值的变动是否有规则。

2. 稳定性、准稳定性和不稳定性

上述 12 种曲线中，究竟哪几类是稳定的，哪几类是不稳定的呢?景观参数的长期变化呈水平状态并且在其水平线上上下波动幅度和周期性具有统计特征的，可称是稳定的。如图 15-7 所示，LT-SRO 和 LT-LRO，就是稳定曲线，它们总的呈水平趋势，上下波动有规则，虽然一个波动较小(如 LT-SRO)，一个波动较大(如 LT-LRO)。

生物系统的稳定性，不是绝对不变的，从个体来说有生长发育，从种群来说有数量增减，从群落来说，有演替，所以说生物系统的稳定性只能是相对的。有人认为，应该用准稳定性来表示这种稳定状态，它不是固定不变的，而是处于动态平衡之中。说它是动态的，因为它还在变化，说它是平衡的，因为从较长尺度来说，它又是不变的。它包括着变与不变两种因素，不变的方面是主要的。不变指的是总的趋势，变指的是局部的波动。

不稳定性指的是波动方式(即总趋势、波动幅度和周期性的结合)经常发生变化或不可预测。如图 15-7 中的其他 10 种变化曲线即属于不稳定的变化，不稳定性可能出现两

种情况：一种是受到干扰后打破原有平衡后立刻建立新的平衡，即以新的平衡代替原有的平衡；二是旧的平衡打破后，新的可预测的稳定状态未出现。

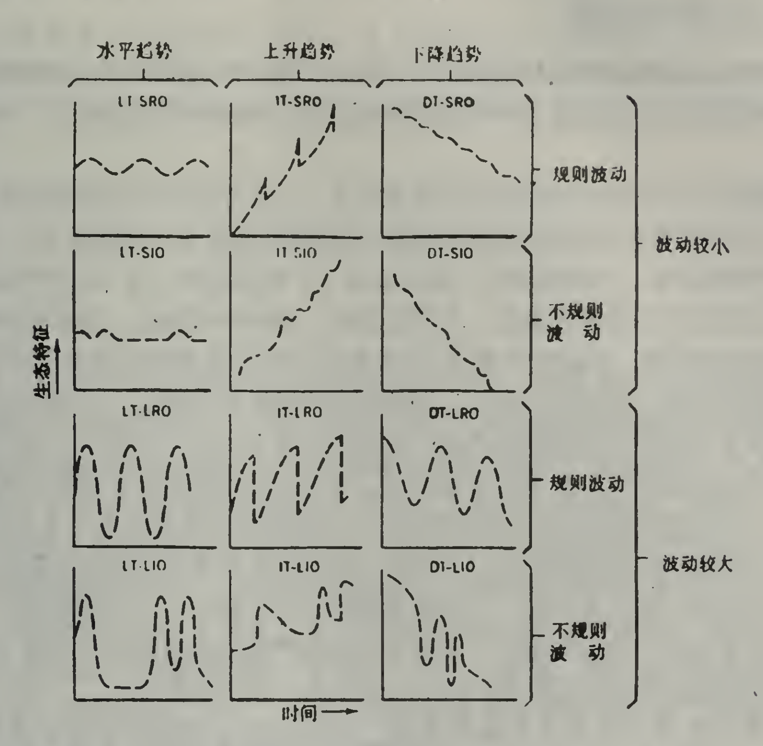


图 15-7 生态系统变化曲线的类型(Forman and Gordan 1990)

3. 关于稳定性的其他重要概念

稳定性的其他重要概念，还有持久性、抵抗力和恢复力等。持久性系指一个系统或它一些分量的持续存留时间。这是比较笼统的提法。抵抗力系指一个系统对某种干扰就地抵制的能力。凡能在干扰作用下各种分量不发生变化的就谓之抵抗力高。恢复力系指一个系统在受到干扰破坏后恢复其功能的能力。例如一片森林容易不容易受到火烧的损害，是对火的抵抗力，而火后能否恢复起来，是它的恢复力的表现。抵抗力和恢复力都是对干扰的反应。从具体指标来说，持久性可以用时间长短来表示，抵抗力可以采用同一干扰下对初始轨迹偏离的大小来表示，恢复力可以采用恢复其原有状态的时间来表示。

关于景观特性与稳定性关系的基本原则是：岩石露头、水泥路面这些无生物定居地，具有物理系统的稳定性，我们对它们的光合表面和生物量估计为零。随着生物量的增加，其准稳定性也增加，顶极群落的准稳定性最大，中间演替阶段其次，先锋阶段较小。从抵抗力来说，顶极群落大于先锋群落。从恢复力来说，先锋群落大于顶极群落。因此，对一个景观来说，可将各种景观要素区分为三种类型：① 具有物理系统稳定性的景观要素；② 准稳定性低的景观要素(即演替阶段早期、生物量较少，多为 r 选择种组成的先锋群落)；③ 准稳定性高的景观要素(即演替阶段后期、生物量高，多为 K 选

择种组成的顶极群落)。第一类实际上是封闭系统，而后两类则属于开放系统。景观内部的变化和整个景观的变化直接取决于各种景观要素的稳定性类型和景观的空间格局。

4. 物种共存和镶嵌体动态

一个生态系统内通常是有很多物种共存的，它们的机制如何，这是生态学中当前集中研究的热点之一。虽然这方面的假说很多，但归纳起来可分为两类：平衡观点和非平衡观点。

平衡观点是从 Gause 的竞争排斥原理出发，以生态位分化作为物种共存的基本机制的。这个观点的基本内容包括如下两点：① 凡生态位完全相同的种，将产生种间竞争，一个种将被另一个种所排挤，最后将由一个种占优势；② 由多种组成的稳定群落必然是由生态位不同的种所组成。所谓生态位，是物种的特性，是指一个种与其周围环境(既包括物理环境，也包括生物关系)关系的总和。从植物角度来说可分为四种生态位，即生境生态位、生活型生态位，季相生态位和更新生态位。生境生态位是指植物对物理自然因素的要求。生活型生态位，包括着个体大小，生产能力、乔木灌木草本等这些属性。季相生态位指的是季节变化格局。更新生态位指的是在成熟个体被下一代代替的过程中为达到成功所表现出来的特殊性，具体地说它表现在种子生产(开花、结实、结种子)、种子散布(空间和时间上)、发芽、成苗、生长等各方面的特殊性。正是由于多种物种在生态位上的千差万别，才使很多物种得以生活在一个生态系统中。还应补充一点的是，在看来是一致的生境中，实际上是由很多微生境组成的，在每一个微生境中，对资源要求相同的种会互相排挤，但从总体来说，却是多种共生。

非平衡观点并不反对竞争排斥原理，但认为由于干扰的存在，竞争排斥不是通则，而是某些局部特点；干扰是维持物种共存的主要机制。竞争排斥原理究竟在自然界能否普遍发生，这要看该原理的前提。它的基本前提有三点：① 确实两物种在同一时间中对同一资源产生竞争；② 要在一个稳定的环境中；③ 要一直等到一个物种完全排斥另一物种所需的时间为止。第二、三条关于环境稳定性和时间长短的前提可加以合并，成为必须要有一定时间的稳定环境。可是，自然环境是极端不稳定的，有昼夜变化、季节变化、年度变化、世纪变化等。由于环境不稳定，并有天然干扰存在，所以就达不到竞争排斥。还有一点，对于竞争排斥起限制作用的还有群落的基本性质。竞争排斥原理是以闭合群落为基础的，而真实的群落实际上是一个开放的群落。一个群落与另外的群落是起着相互作用的，互相有能流、物流和生物流存在。这样在某一处被排挤的物种，将可以迁移到另一处。从某一群落(或某一景观要素)来说，某一种被排斥了，但从总体来说，各物种的比例和相互地位却未发生变化。正是由于干扰在这方面的作用，所以中等干扰假说，特别强调干扰在维持物种多样性中的地位。这点在前面已有所阐述。可见，干扰起的作用与竞争平衡正好相反，它有下述三个特征：一是干扰可创造一种有利于竞争力弱的种的环境条件；二是干扰频度如果比竞争排斥所需的时间短，就可以防止竞争排斥的发生；三是干扰镶嵌体如果在空间上接近于正在发生竞争排斥的镶嵌体，就可使被排斥种迁移到本镶嵌体来。当前，干扰在生物界的重大作用日益被接受，但生态位分化在群落动态中的重要性也不容忽视。同时，还应注意到，生态位的分化与干扰的反应并不能隔离开，生态位的分化就反映在对干扰的不同反应上。

镶嵌体动态学说指的是相互隔离的镶嵌体是变化的。与镶嵌体动态相类似的是“流动镶嵌体”的概念。这个概念强调受到干扰的镶嵌体在空间和时间上的分布是均匀的，并且从总体上景观是平衡的。景观的平衡性是以干扰状况在时间和空间上的分布为前提。一个景观是否平衡决定于两点：① 群落特征和干扰事件之间存在的反馈关系(例如森林病害随森林年龄的增加而增加)；② 当干扰镶嵌体相对于整个景观的面积占的比重较小时。只有这两点同时具备，才会形成平衡的景观。否则，就不能形成平衡的景观。

(二) 景观变化的作用力

1. 作用力的种类

对景观发生作用的作用力可以有人力和自然力之分。自然力又可分为物理力和生物力。人力对景观的变化影响甚大。如人类采伐可使大面积原始森林变成无林地，人力修灌溉渠可使大面积农田变成水浇地，人工造林可使荒山绿化、流沙固定，人为地盖工厂搞建筑可使农业景观改变为城郊景观或城市景观。物理力诸如地震、洪水、台风、干旱、火灾能使景观发生剧变的实例俯拾皆是，在这部分开头所叙述的唐山大地震和大兴安岭特大火灾是我国所发生的、妇孺皆知的例子。生物力中的病虫害的危害也是很普遍的。实际上，每株植物的向上生长，每种植物种群密度的由少变多，都可作为生物力的实例。自然状态下，景观总是趋于稳定的，这正如群落一样，总是由不稳定的先锋群落向稳定的顶极群落发展。不过，这种发展趋势也常被干扰所打断，景观向稳定发展的潜在趋势，是自然界各种因素相互作用的结果。

2. 不同强度作用力的生态反应

我们可以按照作用力的强度分为四级：弱度、中度、强度、极度。弱度的作用力会使景观产生围绕着中心点的波动。如前所述，总的趋势不变，只是产生波动，这是稳定性的基本特点。中度干扰可使景观发生很大变化，它可产生超出平衡的波动，但是一旦停止干扰仍可使景观恢复到原有的平衡状态。例如连续几年干旱可使许多镶嵌体干枯，河流干涸，这显然使景观发生了很大的变化，虽然不同于原先预测的波动类型和波动水平。不过，气候如变为正常，景观就会恢复。强度干扰会使景观产生新的平衡。旧的平衡被打破了，新的平衡建立起来。不过，原有的景观成分还未发生绝对变化，只是它们的相对地位或某些属性有所显著变化，但终归还未达到建立新景观的程度。极度干扰会产生新景观。地震使城市变成废墟，现代的建筑技术使农田在不短的时间内变成高楼大厦。这都是与原景观截然不同的。衡量某一景观变成另一景观的标准是：① 某一景观要素成为基质；② 几种景观要素所占面积的百分比发生了非常大的变化；③ 景观内产生了一种新的景观要素类型。可见，四种强度产生四种结果，即波动、恢复、建立新的平衡和景观替代。

3. 景观稳定性的若干特性

干扰是破坏景观稳定性的因素，但是景观本身也具有抵抗干扰，促进本身稳定的内部机制。

1) 景观系统对物质流和物种流的开放性可加强系统的抗性，促进其恢复过程。每一个景观要素可接受相邻其他景观要素的物质流动和生物有机体的迁移，同时，也可将本身的物质和生物种输送到后者。例如水落到山坡之上，可顺坡流下，流到河里，最后又流到大海。这种对水的开放和运输就可减免洪水危害，如果只有来水，水不能排走，必然会受水淹。又如发生森林火灾，火灾会向其他地方蔓延，这也减轻局部地方的火烧后果。不管什么原因造成景观中的局部生物种群大量死亡，形成的裸地都会有有机体从相邻未受破坏或破坏较轻的地区来侵入，从而使这块裸地的生物种群得以恢复。

2) 景观的异质性可增加系统在环境变化下或在发生干扰时的可塑性，并且在遭受干扰后也容易恢复原状。一般认为，同质性可促进干扰的蔓延。大面积地种植同一种农作物导致发生严重的病虫害。大面积地栽植同一树种的人工林可使森林抗病虫害和抗火的能力减低。相反地，如果在农业中采用不同农作物间作或轮作的方式，使空间上同一种作物互成隔离状态，这样就会减轻病虫害，降低经济损失。对人工林，镶嵌体状混交的优越性，为许多林学家所提倡，也基本是同样的道理。从恢复过程来说，在镶嵌体干扰的土地上，由于环境变化较小，母树离干扰镶嵌体近，天然植被的恢复显然要比大面积干扰镶嵌体容易。

3) 物种多样性和遗传多样性有利于景观稳定。不同物种的生态位不同，对环境变化和干扰的反应也不同。这种差异性对于整个群落、生态系统甚至景观的稳定性都是有利的。同一物种中不同基因型的存在，也有利于物种的保存，同时，也就有利于景观整体的稳定。同样地，物种多样性和遗传多样性也有助于生物系统在干扰后的恢复。

（三）景观变化的转移矩阵

研究景观动态可从多方面下手，如景观各种要素类型所占面积的变化、镶嵌体大小、数量和格局的变化以及景观功能(如水流、气流、物种流)、生物量和生产力的变化。其中，最起码要考虑的是各种景观要素类型的变化。在这方面，人们关心的不仅是各种景观要素类型在一定时期中面积的增减，并且要查清那种景观要素类型在一定时期中分别向其余各种景观要素类型转变的百分率是多少，这个转变百分率就称之为转移概率。为求转移概率，需要有不同时期的图。例如在相隔数年同一景观的地图中，有四种景观要素类型：*A*、*B*、*C*、*D*。把 *A* 转变为 *B*、*C*、*D* 的转移概率列为第一行，*B* 转变为 *A*、*C*、*D* 的转移概率列为第二行，依此类推，直到所有的景观要素类型都有一行，汇集构成了一个转移矩阵。转移矩阵的计算结果取决于马尔科夫链的数学过程。

第三节 景观异质性和景观类型

一、异质性是景观生态学研究的基本出发点

在本章前面的内容中已经分析过许多动物都需要生活在不同的景观组分之中，它们在不同的生态系统中去筑巢、觅食、生育和越冬等等。这个事实证明了景观的异质性对动物来说是多么重要。同样，当我们考察人类生活和聚集时，也发现了同样的倾向。城市“择水”分布的特征类似自然界中某些“湿生”植物群落分布的特点。城市规模越大对水陆界面的依赖性越强。世界上 45 个特大城市的空间位置特征统计指出，有 26 个属“临海型”(占 57.8%)，如果包括距海 100km 以内的，可达 75%以上。其余城市除墨西哥城以外，全部沿主要江、河、湖泊分布。所以说，城市景观主要是水陆界面效应的产物。这是一个重要的生态学边界，它将地球分为陆地和海洋。城市从两种不同生态环境中取得了互相补充的不同资源。许多美丽的风景区都是依山傍水，也表明了人类对于景观异质性的偏好。景观的异质性使人类居住的生态系统具有长期的稳定性和必要的抵御干扰的柔韧性。人类社会需要利用景观中所固有的异质性，并需提高景观的异质性。

异质性是指在一个区域里(景观或生态系统)对一个种或者更高级的生物组织的存在起决定作用的资源(或某种性状)在空间或时间上的变异程度(或强度)。景观组分和元素在景观中总是不均匀分布的。异质性是景观生态学的重要概念，空间异质性的维持和发展是景观生态学的重要内容。景观生态学研究空间异质性的发展和维持、异质性景观中不同组分在时间和空间上的相互作用以及能量与物质的交流、异质性对生物和非生物过程的影响以及对这种异质性的管理(Risser et al. 1984)。

景观异质性有时间异质性和空间异质性，是多维的，是时空耦合异质性。空间异质性带有边缘效应。正是时空两种异质性的交互作用导致了景观系统的演化发展和动态平衡，系统的结构、功能、性质和地位取决于其时间和空间异质性。所以，景观异质性原理不仅是景观生态学的核心理论，也是它的方法论基础和核心。景观异质性与功能密切相关。动物对多种景观元素的利用和在景观中的运动证明了这一点。例如，日本甲虫生活在潮湿生境中，那里适宜它们大量繁殖，但捕食它们的天敌也大量集中在同一生境中。在条件适合的年景，大量繁殖的甲虫有一些也会迁移到较干燥的镶嵌体中去，而那里捕食者并不集中。到了干旱年份，在潮湿地方生活的甲虫由于被捕食而死亡，而干燥镶嵌体中的甲虫反而存活率较高。因此，日本甲虫的密度和稳定性很大程度上取决于每种景观元素类型占总面积的比例。这个例子证明异质性在物种共存方面发挥了作用。

动物对不同景观元素的利用关系是复杂的和微妙的，它使我们对生态位原理有了更进一步的认识。生态位是指与某种物种有关的各种生态因子和生态关系的集合。当我们从景观异质性的角度去观察，把动物对景观中不同组分(或生态系统)的综合利用考虑进去，生态位理论被拓宽和深化了。一种动物的生态位既不能用食物网中互相连接的“盒子”网络中的一个“盒子”来完全地表示出来，也不能用一系列沿环境梯度绘出的耐受性曲线来完全表示，它们都必须通过对景观中异质性的生态系统的集合体的利用而放大。动物对景观中不同类型组分的利用情况提示我们，越过边缘和通过汇集点的运动是

大量的。一些动物在边界附近的活动有时会产生另一种景观格局，当物种由于受到另一种元素的影响而使其运动受到阻止时，会形成一个排斥地带。例如道路将红狐阻止在90m 以外。一种景观元素中的热量、污染物、食草动物、捕食动物都可能对某个物种的运动造成排斥或禁止作用。

人类和动物都需要两种以上景观元素的事实证明了异质性在生物圈中存在的重要性，这对我们理解物种共存、生态位以及对野生动物和昆虫的管理是极其重要的。地球上多种多样的景观是异质性的结果，异质性是景观元素间产生能量流、物质流的原因。

二、异质性产生的机理

(一) 热力学定律和耗散结构理论

热力学第一定律告诉我们，能量由一种形式转变为另一种形式(例如燃煤发电)，其总能量在转变前后保持不变。即能量既不能产生也不会消失。同时，我们也知道能量的转换率不会是 100%。比如燃煤发电产生的能量少于煤中原来含有的全部能量，损失的能量是以热能的形式丢失了。热力学第二定律对此作了进一步的解释，一个与外界没有能量与物质交换的孤立系统经历了不可逆变化后，终态之熵大于始态之熵，即熵增原理， 熵是系统中无序状态的量度，所以熵增加意味着孤立系统逐步失去其结构，趋向于组成它的所有分子的同质混合物。例如气体向真空的自由膨胀，冷热气体的自由混合等等。

而生态系统是远离热力学平衡的开放系统，其熵减少。普利高津的耗散结构理论指出，线性非平衡态显示与平衡态相似的特征。但在给系统增大压力时，一个新的有序结构出现了，这是非线性的不可逆的热力学过程，在与外界有能量与物质交换的开放系统中，在非平衡条件下出现的自组织，这就是普利高津及其同事发现的“非平衡是有序和自组织之源”。这种自组织的有序结构的出现和维持，是靠消耗与环境交换的能量和物质来维持的，普利高津称之为耗散结构。

景观也是一个与外界有物质与能量交换的开放系统。太阳能与地球内能以负熵流的形式流入，以抵消系统内部的熵的产生。这两种能量在景观系统的水平与垂直方向上的分布是不均匀的，造成系统在热力学上的非平衡态。当在近平衡条件时，能量和物质的传输近似于线性传输，但当能量和物质的交换进一步增强，达到远离平衡态时，由物质和能量交换给系统带来的小起伏，经过系统各单元间正反馈环的增强作用，可引起系统大的涨落，出现自组现象，产生新的、动态的、稳定的有序结构。这就是普利高津的“有序通过涨落”自组织化的有序原理。在生态系统中，能流，物流，信息流都有反馈机制。正反馈环起着自我增强作用，将小的起伏放大到大的涨落，引起自组织化；系统中负反馈环起着自我减缓的作用，将变动收敛到原来的水平，以保持系统的稳定。能量和物质交换的负熵流是生态系统存在和发展的条件。在这种条件下，系统通过能量耗散的耦合作用，产生和发展时空有序的生命现象。

日本学者的异质共生理论认为增加异质性、负熵和信息的正反馈环可以解释在生物

系统的发展过程中自组织的基本原理。自组织形成以后可由自稳定的偏差抵消过程来维持。

(二) 景观异质性的产生

在开放系统中，能量由一种状态流向另一种状态，建立了新结构的同时也增加了异质性。而累积热量的地方则增加了同质性。景观异质性产生的机制是热动力学机理，即是从太阳光放射的能量流中产生的。造成目前空间异质性的阳光能量可以分为三个不同的时间周期：① 地球的原始形成时期，有炽热的地核和逐渐冷却的地球表面；② 古代植物繁盛期，随着地壳变动它们演变成了化石、煤、石油和天然气；③ 现今所有的这些过程如风化、沉积、动植物的迁移、食物网的发展等等都依赖于太阳能，在大多数情况下这些过程提高了异质性。此外，人类对生态系统的影响日益增大，在景观异质性变化方面发挥了重要作用。人对自然的改造过程向系统输入了更多的能量，主要是以化石燃料为主，而这些化石燃料是几十或几百万年以前古代植物从太阳能中吸取并累积的能量。在这种情况下景观的异质性是由于过去形成化石燃料的太阳能和今天直接吸取的太阳能的输入而形成的。以上是从分子水平开始直至景观中的动物和人不同景观元素的需求方面探讨了异质性的本质。下面要对景观的分类进行讨论。

三、景观类型的研究

异质性的结果使地球上形成了形形色色有待分类的景观。虽然热力学原理是产生异质性的基础，但由于我们对这方面的认识还不够深入，因此还不能据此进行分类。生物和化学元素的分类研究启示我们，建立类型学的第一步是要找出特征属性，第二步是建立等级体系。例如在观察景观时，我们看到的景观中有的存在廊道，有的不存在，有的廊道是互相连接的，有的不是，在廊道的宽度上有线状与带状之分等等，把这些属性进行比较，显然存在与不存在廊道这一属性等级高于连接性和宽度的属性等级。可见景观类型学等级体系是自然界客观存在的。

(一) 自然等级组织理论

整个生物圈是一个多重等级层次系统的有序整体。每一个高层次系统都是由具有自己特征的低级层次系统组成。基本粒子组成原子核，原子核和核外电子组成原子，原子组成分子，分子组成细胞，细胞组成生物体，生物个体组成种群，种群组成生物群落，生物群落与周围环境组成生态系统，生态系统组成景观，最后，直至组成全人类生态系统。按纳沃的意见，全人类生态系统是通过地理圈对技术圈和生物圈生态区的整化，是全球景观和最大的系统。

维系生物圈等级组织的是结合能量。Laszlo 认为，低级组织的结合能量强，而高级组织的结合能量弱。核裂变释放的巨大能量说明了质子和中子的结合能量较原子核与外层电子结合能量要强得多。而生态系统中和社会系统中把人和所有的生物物种联

系在一起的力量则易于消逝。构造体积、组织层次和结合能量是一个绝妙的连续统一体。体积越大，组织层次越高，结合能量就越弱。

生物圈的等级组织中，不存在绝对的部分或绝对的整体。任何一级组织对下来说是独立完整的整体，而对上来说又是从属的部分。Kosuer 称这种二重结构为整体性部分，它是更高级整体的一部分，有自我超越的趋势；而由于它在整体等级中保持了个体自立性，又有自我肯定的趋势。

等级组织理论包含着尺度效应。等级组织是一个尺度概念，它有助于研究自然界的数量思维，对景观生态分类具有重要意义。

(二) 土地生态分类

景观生态学把最基本的空间单元——立地作为研究的重点。在植物生态学和森林生态学中，把植物或群落生长的具体地段的环境因子的综合叫立地或生境。景观生态学上的立地概念与上述内涵是一致的，认为它是由地表形态、生物和小气候状况所规定的地球表面某一具体地段，其上的物质(主要是营养物质)和能量的数量与利用率、分布及运行状况，决定着生态系统的类型、生产力和稳定性，并反过来不断地改造着立地。故立地被看做是生态系统在空间上和时间上的一个缩影。某一区域立地或生境类型的总和及其空间分布格局构成了该区域景观的特征。Troll 认为每一个自然区域可以划分为很多小面积的“地域单元”，它是指一个气候和土壤因素相同的地域。立地或生境等名词可以替代“地域单元”一词。一个景观生态学家必须熟知立地的历史和现状，这是在计算机时代也不能忽视的基础研究。

根据一个区域内地质、地貌、土壤、生物、水文、气象等要素的差异，生境可以被组合成不同层次的自然单元，可以依据一定的分类指标对该区景观进行分类，分类系统和标准因目的而异。例如佐来维尔德提出了自下而上的 4 个层：

1) 生境(或立地)。内部特性(气候、植被、土壤、水等)具有高度同一性，是最小的综合土地单位；

2) 土地刻面。由生境组成，生境间形成某种空间关系，内部特性至少有一个特性(如地形)同一；

3) 土地系统。由多个土地刻面组成，常构成一个制图单元；

4) 景观。某一区域内所有土地系统之和。

以生境为基础构成的分类层次，实际上反映了土地生态系统类型的模型。土地生态分类是景观生态学早期最基本的研究内容之一，也是重要的应用领域。它通过航空遥感技术把景观学的“自然地理综合体”类型划分与生态学的“生境”类型划分结合起来。加拿大在土地生态分类方面做出了突出贡献。土地生态分类指土地调查的综合方向，特别强调土地的生态属性和生态功能。分类过程包括有对有关土地的生物与非生物特征的描述、比较和综合，可以“把地球表面划分为各种尺度的有意义的地域单元，认为每一单元都具有一定的内部一致性与功能完整性”，目的是提供一个对资源利用与保护有意义的土地单元的综合调查方法。

(三) 景观类型的划分

“对独立的土地要素所进行的任何综合自然地理的或综合的调查研究，事实上都应用了景观生态学方法，即使应用者从未听到过景观生态学这个术语”。土地生态分类实际上是对自然景观的分类。在英澳等国常用的“土地类型”一词与自然景观的含义大致相同。土地生态分类为景观类型学的形成打下了基础。

景观分类等级体系同样可以分为从上而下和自下而上两种。在一个等级体系中， 高层的分类标准应该有广泛而概括的重要性，具有最大的综合能力。

下面介绍自上而下的5级等级体系：

1) 地带性气候。无论基岩、地势起伏以及人类影响造成的差异与气候相比都是相对的小尺度，气候带是最高等级的空间单位，它主要与纬度有关。气候带在全球的分布是明显的，例如地中海型气候带的特点是夏季干燥、冬季温和多雨，地中海景观不仅包括地中海沿岸，还包括同纬度的冬季降雪量达 1m 多的美国加利福尼亚、南非开普敦、澳大利亚南部和西南部地区等。简而言之，一个大的气候带贯穿于它的所有景观之中。

2) 气候区。借助气象资料可以看出每一个大的气候带能被分为有明显不同的气候条件的气候区。其差别与主要风向、海洋的距离、海拔高度等区域自然特征相关，也受政治、经济、文化的影响。一个气候区的许多景观，它们有相似的光照、降雨等气候特征，其中不同景观动植物形态上的相似也证明了这一点。

3) 植被带。景观与海拔高度相联系。这种海拔高度被称为生物气候单元，因为它大体上反映了气候与动植物分布。植被带是某一生物气候单元明显的植物群落，每一个植被带都有几种土壤类型、植被和土地利用等因素同时存在。生物气候单元以其明显的植被带可使同一高度水平出现的景观元素依次联成一体。如果能满足景观基本特征的条件，它就是单个景观。

4) 地貌单元。在每个生物气候单元中，通常土壤条件差异明显。虽然在大区域中土壤按地带性规律分布，但局部立地条件强烈影响土壤发育过程。例如岩石靠近表层还是深层，将形成不同的土壤和植被。差异明显的地貌单元在一个植被带中延绵数公里，就形成了不同的景观。

5) 人类影响。人类影响可以在几百米甚至几十米内造成明显的差异，在一个地貌单元中的城市景观、郊区景观以及灌溉农业景观就是最常见的例子，它形成了第五个等级。

当然也可以构成自下而上的景观分类等级。其优点是以具体事物为出发点，避免了主观性。该分类可以根据景观组织特征进行分类。方法上可以采用同时处理许多变量的多变量法，也可以采用连续使用各方面的有用信息，在分析成对特征之间的关系的基础上进行分类的直接法，或者两种方法结合使用。

然而不论是从上而下的分类体系，还是自下而上的分类体系，都是描述性的分类；还没有涉及景观分类的本质。前面的讨论证明，决定景观性质的力就是引起景观异质性的力，它是一种受热力学定律控制的力。景观分类的本质可能也在于此。根据景观系统内部水热状况的分布，物质与能量交换形式的差异，按照一定的原则用系列指标反映这

些差别，就可以将一系列各具特色的景观生态类型进行划分和归纳，揭示它的内部格局、分布规律和演变方向。纳沃把能量、物质和信息作为景观系统分类的根据，更有可能把握分类的本质。他把能量划分为太阳能和化石能，把物质划分为自然有机物和人造事物，把信息分为生物-自然信息和自然控制与文化信息，还有人为控制信息。根据这些指标划分出了自然景观、半自然景观、半农业景观、农业景观、乡村景观、半城市景观及城市景观。我国李哈滨建议："景观应该根据其地貌学和植物学特征以及人类影响的强度来分类，并以其地貌类型(如山地、平原等)、基质上植被的主要建群种(如花旗松林、红松等)以及主要植被类型(如森林、草原等)来命名。例如，美国西北部地区喀斯特山脉西侧的山地花旗松森林景观，中国东北地区小兴安岭、长白山的山地红松森林景观，中国东部长江下游的冲积平原稻田景观等等。人类对景观的影响程度可以作为景观在更高水平上分类的一个准则。"

划分景观类型的目的是作为景观评价的单元，选择对环境最有意义的生态特性进行评价，作为景观优化的基础。例如，在欧洲农业景观变化的研究中，人们把景观分为13 种类型，探讨了它们在不同农业政策下的前景。

尽管现在还没有形成一个完善的景观分类体系，但人们所做的努力都是从描述性分类逐步走向"结构与功能分类"，强调不同土地单元在生态属性上的联系与差异，并加入和强调人文景观类型的划分。未来的景观类型学可能是一种发育的或形态发生的分类体系，它将现在的相互关系问题与功能联系起来，其基本原理将把分子水平与宏观景观分类联系起来，同时考虑到热力学、稳定性和干扰。

第四节　景观的生态监测

宏观领域(包括景观、区域和全球生物圈等)的生态变化直接涉及人类生存环境，因而受到愈来愈广泛的关注。全球变化的研究就是一个典型的例子。我国曾组织国土开发整治与人地关系的系统研究，显示出宏观生态监测是保护人类生存环境的重要手段。本节就近年来的景观生态监测的时空尺度、空间分析手段和动态预测做简单介绍。

一、时 空 尺 度

景观动态监测的最有效方法，就是借助于周期性的航空航天遥感资料对景观进行定时跟踪监测，对同一区域不同年份的航片卫片进行对比，不仅能记录生物群落的更替，而且能够同时观察广阔范围中人为活动引起的剧变，在获得资料的基础上进行数学计算，能够相当准确地预测可能发生的生态变迁。为了有效地运用重复摄影对景观动态进行宏观监测，就必须涉及时空尺度问题。

关于监测的空间尺度要因研究的目标而定，不可强求统一。沈阳应用生态所的方案建议分别在经济发达地区、重点整治的生态脆弱地区以及生态脆弱或破坏严重地区等分别监测 10 000km^2 的面积。美国科学家提出地区性生物圈观测台站所占景观单元面积为100km^2，他们进行景观格局指标研究所选定的 96 块景观区，每块面积 1.9×10km^2。前苏联一些学者提出在 1∶10 000~1∶30 000 的大比例或中比例航空摄影图片上可以很好

地辨识具有足够宽度的群落，以及有着多种土地利用的形式和发生巨大破坏的复杂生态系统，他们认为摄影比例尺应该保证在照片上辨识生态系统的可靠程度不低于95%~99%，否则，解译的错误会掩盖生态系统中发生的变化。气象卫星的象元为1km^2，它能辨识的一些动态有时在大比例尺上是看不到的。因此，空间尺度要由研究对象的特点来定，一般来讲，以自然干扰为主变化的监测空间尺度要大，而以人为活动干扰为主变化的监测空间尺度要小一些。

关于观测的周期，前苏联学者认为在稳固的生态系统占优势，人为影响不显著的稳定地区，每 10~15 年进行一次摄影就足够了；在变化和缓地区，人为影响尚未根本破坏自然过程的进程，监测周期可定在 7~10 年重复一次；而多数经济发展的农业、林业、城市地区，监测周期要缩短到 3~5 年。

我国学者提出监测的项目包括：景观单元空间结构的变化，土地利用状况的变化，土壤侵蚀和土壤肥力的变化，植被的种类、组成和生物量，农作物产量和生物量，水资源的开发利用状况，居民点和人口的变化状况，交通道路的变化状况，环境污染状况，区域经济发展状况等。除此之外，还要根据研究的目标增减一些项目。

二、遥感技术的应用

遥感技术以其多平台、大范围、多波段、多时相的特点，广泛应用在资源、环境、生态研究的众多领域。利用遥感技术进行景观动态监测，具有视阈广、宏观性强、监测同步、信息廉价、数量巨大等特点，可以加速景观制图的全过程。

遥感影像一般提供两方面的信息，一是形态信息，二是色调(灰度)信息，通常可以直接反映一个地域的地势、植被、地表水分布状况和土地利用特征。而气候、土壤、地下水，环境污染等特征一般不能直接反映出来，但可以借助特殊的光学处理方法或借助间接指标解译一些参数。因此，首先要利用生态学知识在典型地段上建立判译标志，建立各组成要素之间的相关特征，然后在遥感影像上判译，推测间接因素的状况，把研究成果反映到生态图上，最后还要选一定区域进行调查验证。

三、景观生态制图

景观生态学的研究工作都是在各种图件的基础上进行的。景观生态制图既是必不可少的研究手段，又是研究的主要成果之一。前苏联学者贝尔格指出："没有景观图，景观就会像悬在空中一样。"对景观结构进行分析和制图是景观生态学沿用了传统地理学的方法，是地理学与生态学结合的产物。

景观生态制图多是在土地分类制图的基础上完成的。由于所调查的土地自然条件不同，以及调查方法、时间、服务目的的不同，制图方法有明显的不同。

利用地理信息系统进行景观生态制图是近年来得到迅速发展的方法，这项工作有三个基本要素，即数据、数据处理工具和概念模型，这 3 个要素处于平衡状态，当中心维系轴稳定可靠时，数据收集处理可顺利进行。从作为信息处理工具的信息系统获得的最大收益不是速度加快，而是向用户提供大量数据的能力和途径，不仅是目前存储大量数

据的能力，而且有重新获取和转换占据时空数据的可能性(黄杏元　1989) 。

在静态分级、分类的情况下，专业地图起到数据存储和景观模型两种作用，而在这种情况下利用地理信息系统，我们可以获得数字化数据库，并根据需要进行转换、分类和显示工作。为了将数据转换成信息，我们必须对数据源、提取和转换过程与期望结果间的关系有足够了解。

我们可以用数学形式写出 $R=f(a, b, c, d\cdots)$，式中：R 为将这一转换过程系列 a, b, c, $d\cdots$应用于已知数据上的结果。这个转换过程代表一个概念模型的格式化，称之为“关联”，经常要进行转换或十进制计算。

当用户掌握了类似普通语言的机器语言，就可以用这种语言表达他的概念，以便在数据和输出结果之间建立起所需的联系。当数据输出后绘成地图时，可以将这种关联的产生称之为“制图模型”。

在地理信息系统所用的大多数制图模型中，数据依照一个或多个关联被提取出来或转换。比较典型的例子就是通过给土壤图重新着色或是由操作人员有选择地利用“系列设备”对卫星影像进行 Pixels 分类，将土壤图制成适宜的地图。这种转换称之为“静态的”，因为原始数据是最后输出内容的核心。然而，在其他情况下，景观过程可能在起作用，以致随时间的流逝，可能对变化起很大影响。侵蚀与沉积、地下水位发生变化导致含盐量的增加，由于管理造成植被构成的变化，由于经济的发展导致土地利用的变化等就是景观过程的几个佐证。如果这些景观过程能够模型化，它们本身便可以称作“关联”。

没有好的数据是不会取得好的结果的。在地理信息系统中数据并不是不可靠性的惟一来源，误差还可以在数据处理过程中产生，例如地图叠加时，或者选用了有疑问的关联或制图模型，等等。

荷兰阿姆斯特丹大学自然地理和土壤科学实验室研制的景观制图方法，其制图单位系统是以描述特征、识别特征、附加诊断特征为依据的，强调了地质、地貌和土壤数据间的关系，具有坚实的自然地理学基础。而国际航空测量和地球科学研究所研究的土地综合分类系统将地貌资料与岩石、土壤、沉积物、植被、地表水和地下水的资料综合在一起，确定了 4 个分类等级：土地要素、土地单位、土地系统和土地省。该分类系统特别适用于航片解译。1974 年马得勒支大学自然景观生态研究小组区分了两类景观图，一类是景观形态图，以单个要素为制图对象；另一类是景观功能图，是以生物要素和非生物要素的空间功能联系为对象，它主要包括三方面图件：生物系统图、自然系统图和景观系统图。

四、景观动态预测

生态监测的任务是不断地监视自然和人工生态系统及生物圈其他组分(如地下水、大气)的状况，确定其改变的方向和速度，并查明不同的人类活动对这些变化所起的作用。而生态预测是预告在长期气候波动的背景下，不同的人类活动影响条件下，生态系统的结构和功能的可能改变，并对其不利后果发出预警。由于宏观生态变化的影响因素复杂，参数难以确定，动态预测的方法还很不成熟。本节着重介绍两种。

(一) 生态变化趋势模型的建立和外推预报

生态预测的基本方法是利用系统分析方法建立预报模型。生态系统面积变化的最简单情况，用下面这样简单线性相关式可以描述：

$$Y=a(x_i-x_0)$$

式中：Y 为所研究生态系统的面积(也可是景观的面积，下同)；a 是它的每年变化率，用年百分比表示；x_i 为记录年份航空航天照片上生态系统(或景观)的面积；x_0 为生态系统变化开始年份的面积。

然而，用外推法预测开垦土地面积有着更为复杂的形式，因为只有存在适合于耕种的土地后备资源，开垦面积才能增加，后备资源一旦耗尽，所谓质的转变点就马上到来，这一年之后，耕地面积将缩减，这个质的转变点年份可用下面的方程式算出：

$$S=a(x_{ijm}-x_0')+b(x_{ijm}-x_0'')$$

式中：S 表示所研究区域总面积，取 100%；a 为非农业用地征用面积增加率，以每年占地区总面积的百分比表示；b 为开垦土地面积的增加率，以每年占生态区总面积的百分比表示；x_0'为建筑占地开始年份的面积；x_0''为开始开荒年份的面积。

上述公式是对生态变化最简单情况的预测，而我们经常处理的不是简单的线性相关，而是离散片断的非线性函数。前苏联学者在罗斯托夫省干旱草原地区利用 1962 年 1970 年和 1978 年的航空及航天遥感资料，用外推法预测了可垦土地面积的变化(如阿姆河三角洲景观生态系统的动态)，建立了下述模型：

$$Y=a+b(x_0-x_i)^{\alpha}+c(x_0-x_i)^{\beta}$$

式中：Y 为该生态系统的面积；x_0 为开始变化年份的面积；x_i 为摄影年份的面积。结果显示：生长芦苇的老年期湖泊在 1954 年占三角洲总面积的 32%，居于稳定地位，而后就急剧干缩，1978 年开始消失。随着盐渍化的发展，盐土面积从 1978 年的 20%将继续上升，如不安排好供水，到 1994 年中亚泛滥地森林将全部消失，2015 年草原沼泽将消失，2024 年全区将会成为盐土荒漠。

根据卡耳梅次黑土地区 1954~1983 年的遥感监测资料，对由于集约化放牧引起的土壤沙漠化现象进行了研究。这个过程用下述方程式加以描述：

$$Y=\exp\left[a(x_0-x_i)\right]$$

式中：a 为流动沙地面积每年的增长率。对这个方程式作追溯分析(即向过去时期的外推)，可以得出结论：在 1946 年沙地是稳定的，而加速沙漠化大约开始于 1960 年，到 1992 年流动沙地将囊括沙土地带的全部地带。

对复杂系统动态的估计，首先需确定景观生态系统整体的变化方向，是趋向恢复还是趋向破坏，通常可以按下式计算：

$$C=\sum c_{ij}-\sum c_{ji}$$

式中：$\sum c_{ij}$ 为正向转变的空间频率总数，$\sum c_{ji}$ 为反向转变的空间频率总数。在中拉脱维亚森林-沼泽-旷野区进行的动态监测，选用了 1936 年、1956 年和 1974 年的监测资料，推导出了该区景观生态系统动态模型。分析表明，景观的变迁主要与森林采伐、开垦采伐迹地以及开垦自然草场和牧场、疏于沼泽和开采泥炭地相关。在查明的全部变迁中，只有 20%的面积属自然更替，而 80%属人为因素造成的剧烈变动。该分析还预测到 1992 年割草场、牧场、沼泽、沼泽化林地、灌木林和林地中的幼林将完全消失或极为稀少(少于 1%面积)，主要是建筑占地，农田将缩减 5.4%，由于幼林的自然成长，中等成熟林面积将显著增加(10%)。

外推预测预报的优点在于，可以根据生态形势改善或恶化的程度，对预测预报进行修正。例如 1969 年判断卡腊-博加兹-哥耳湾的水到 1983 年应该干涸，但是现在海湾的水更多了，这是因为及时引送了海水，从而使这处独一无二的水体化学系统及时保留下来。

(二) 景观生态变化的地球物理效应——生态预测的新方向

不同景观的空间结构和生态系统的变化造成地面覆盖状态的差别，从而影响地面的反射率。将自然生态系统状态(在保护区)与人为影响出现的变态加以对比之后，就可以估算出在人的经济活动影响下生态系统动态的地球物理效应。根据被比较的同地异态生态系统(自然的与人为因素影响的)色彩明显程度的不同，可以制定人为变化的光学效应，而根据红外图像的差别则可以计算其辐射效应。比如荒原牧场只要有中等程度的放牧，光亮度(图像)就平均每年增加 0.04，砍伐森林为 0.08，相反，大草原焚烧尽可使该地段光亮度平均每年减少 0.08、开垦草原则可以使光亮度减少 0.04。这些物理变化孕育着严重的气候后果。正如布德科所指示的，反射能力只要变化 0.01，温度平均变化为 2.3℃。

地表反射率的季节性变化比年平均反射率对气候的影响更为突出。在农业区，草原禁区与农田相比，光亮度差别在个别季节达 0.18；在牧区，草原禁区与严重破坏的牧场相比，差别达 0.16；而在林区，森林保护区与采伐迹地比较差别达 0.15。从这些实验资料可以清楚看出，人为干预所引起的即使不大的地球物理效应，其季节性的地球物理偏离也能导致激烈的水文气象变迁。对景观生态系统变化的地球物理效应进行遥感监测， 是生态预测的新方向，有助于做出长期预测。

第五节　景观生态学规划与管理

景观生态学与景观和城市规划及设计有密切关系。景观生态学的主要目的之一是理解空间结构如何影响生态学过程。现代景观和城市规划与设计强调人类与自然的协调性，自然保护思想在这些领域中日趋重要。因此，景观生态学可以为土地规划和设计提供一个必要的理论基础，并可以帮助评估和预测规划和设计可能带来的生态学后果。而规划和设计的景观可以用来检验景观生态学中的理论和假说。这种关系似乎象物理学与工程学之间的那种相辅相承的关系。此外，景观生态学还为规划和设计提供了一系列方法、工具和资料。例如，景观生态学中的格局分析和空间模型方法与遥感技术结合，可以大大促进景观和城市规划与设计的科学性和可行性。景观规划与管理是运用景观生态学原理解决景观水平的生态学问题的实践活动；是在理解景观功能、结构和变化特征的基础上，应用生态学原理，经过景观生态学评价提出景观优化利用的空间结构和功能的对策和方案；是对原有景观元素优化组合或引入新的组分，经调整构成新的景观格局，并据此对景观进行长期的动态维护、管理。规划与管理的目标是广泛的，从维护景观多样性、保护稀有物种、削弱有害环境影响直到空间布局最优化。而其中最重要的原则是：① 整体化原则，即把景观作为一个整体来考虑和管理，实现多学科知识的综合，达到整体的最佳状态，实现优化利用。② 发展、维持和管理空间异质性是规划管理的核心问题。景观规划与管理采用的方法是多种多样的，常采用数学模拟方法使复杂的现象抽象化，然后再进行研究。地理信息系统等先进手段可以快速收集和处理各种图形和数据，是景观规划与管理的有效手段。

一、规划管理中的生态学方法及建模

(一) 规划与管理的一般生态学方法

在规划和管理景观元素时，首先需要评价镶嵌体—基质间的关系，其中包括需要增加的新的镶嵌体怎样受到周围异质性的影响，它又是怎样影响着周围的环境；其次是评价现有景观元素的特性，其中包括相对的惟一性(度量不同尺度条件下，从区域到全球，有多少相似的该景观元素)和恢复时间(原来的景观元素受到干扰和破坏后，以相类似的形式取代原有景观元素需要多少时间)。相对的惟一性高或恢复时间长，反映该地点对建立新的景观不合适，如果相对惟一性低和恢复时间短，就可以进一步评价所建议的新的景观元素对周围环境可以产生怎样的影响。

在上述工作完成以后，研制输入输出模型，以评估该立地最适宜的条件和人类影响的最高水平。在这里，可以把该立地看成一个箱(黑箱)，赋予它定量特征、立木数量、本地种多样性、果实年产量、人口密度、水量保持等等。最简单的输入可分为：大气输入、土壤输入和人类直接输入，前两者包括降水、二氧化硫、风吹来的种子、腐殖酸等；人的直接输入包括车辆排放废物、使用杀虫剂和栽种等等。输出也包括三种：大气输出、土壤输出和人类直接输出。人类直接输出包括农、林、牧的收获，大气和土壤的

输出包括污染物质。

应用这一模型将有三个主要结果，即：

① 人类直接输入与输出的比例，这个比例是必须给以评价的经济、社会和生态费用的一部分，可以从资金意义上表示，也可以用热量来表示。

② 在大气流和土壤流中，污染物输入与输出的水平差异。

③ 代表该立地的黑箱中特征贮藏量等级的变化。这种测量主要说明新的元素是否会引起系统加积?是仍然处于稳定状态还是已经衰落?

必须对模型三个特征赋予主要加权值，才可以进行最佳条件筛选，和实现在最高等级的人类影响下的规划与管理。将三种特征综合起来，我们可以依据干扰的敏感性(包括人类的影响在内)对不同生态特征进行排序。

评价可能的衰落趋势时，从最敏感的开始，按发展顺序有如下变化：① 种的相对丰度开始改变；② 敏感种开始消失，本地种多样性开始减少；③ 非本地种开始移居迁入；④ 生物量和覆盖开始减少；⑤ 生产量开始减少；⑥ 侵蚀开始增加。

其他生态特征也将受这些变化影响。这些通用模式成为景观设计管理者和生态学家的实用指南。做出最终的决策还需考虑生态、经济和社会效益。总之，一个明智的规划管理者应将生态系统作为异质性景观中与其他系统相互联系的元素而不是孤立的元素来对待。

(二) 管理中的张量模型

当我们把景观看成它的过去的功能产物时，采用系统分析方法是很自然的。对组成景观的生态系统群进行管理，需要有模型的外观，它有助于对一个复杂的研究目标使用简化的、非文字的、图解性的或数学的描述。

景观的规划管理需要各种类型的地图，采集信息建立模型。建立模型一般采取 5 个步骤：

① 目标描述；

② 检测主要轮齿或耦合；

③ 将其组装成临时(模型)形状；

④ 让这个组装体试运行；

⑤ 观察实际情况和模型中的不符情况，返回到步骤 1)、2)、3)中。

模型需要满足的最重要的条件是必须包括管理土地的空间差异性。这个目标可以通过土地利用或占用地图来实现。这类图反映了植被类型、“人工化”和优势种的综合情况。采用土地利用示意图，可以制作“张量模型”。

每种景观元素的应用可用一数学矩阵来表示。在这种情况下，矩阵的每一行代表了土地利用的一个特征参数，例如稀有种的保护、土地价值等；竖列是连续的时间间隔，主要用于描述各参数随时间的变化。几个这样矩阵的结合可形成数学上称为“张量”的 n 维的数组。一个景观的张量是由与现有的景观元素一样多的大量矩阵组成的，张量是说明所有这些景观元素变化的模型，即景观作为一个整体的变化。张量的用途在于推断

所建议的每一种景观管理的策略，因此可以对预期的随时间的变化进行比较。在这里，张量以其基本形式将用于两种目的：① 描绘土地潜力；② 评价供选择的不同管理方案的直接后果。

土地潜力系指一个地区土地的可利用性及其价值。① 土地潜力的一个主要类型是利用有效技术所能收获的产量和直接获得的经济价值。② 土地潜力的另一个主要类型是某一景观在生态调控中的基本作用，这种作用是保持平衡所必不可少的，但要用经济学概念计算总量是极其困难的，如防止洪水、侵蚀和害虫爆发的自然植被等等。③ 土地潜力的第三个主要类型是不仅考虑它的经济意义，而且要注意土地对人类的美学、治疗和精神的价值，这些已在艺术、文化、宗教和个人经验中得到证实。

为了更好地了解土地潜力张量是如何建立的，可用一简单的实例来加以说明。在布奇尔省(伊朗)管理人员采用禁止冬季放牧的方法来改良以灌木、普通枣树占优势的温暖石灰岩山坡上的牧场。从该方法采用的那一年起，几个重要的参数发生了变化：一是由于有大量的一年生物种(包括牧草和豆科植物)，地上部分的生物量增加；二是被牛群消耗的植物量增加；三是牛群数量多了；四是当地居民所消费的牛数量变化了；五是当地肉市销售的商业收入变化了；六是牲畜的饲养费用变化了；七是在暂停放牧期所需饲料量也随之发生了变化。

这些参数随时间的变化可用一矩阵来表示，在矩阵中每行代表一个参数，而列代表时间。这个矩阵表示如果禁止放牧，山坡土地的潜力。结果表明，在那些暖坡牧场中，植物覆盖层由于禁止放牧而连续 3 年生物量增加，以后则保持稳定。

对较冷的石灰石土壤上的牧场建立了第二个矩阵。两个矩阵(一个代表暖坡牧场，另一代表冷坡牧场)各有 13 行(13 个有关参数)10 列(连续 10 年)，它们像书页那样上下放置，就形成一个两页的张量模型，即土地潜力张量。我们也可以用类似的方式建立景观重建或者在自然条件下景观变化的张量模型。

一个张量模型的结果取决于矩阵行中的参数。一个完整的景观管理规划还要包括与生态调节和与美学有关的关键参数。在上面的例子中，为了完善管理须加入肉产量、经济系统、居住区、生物多样性等大量参数。研究者提出了 4 种禁牧方案，计算了这些改良措施的效果并进行了比较，结果表明这些行动须经几年后才能完成。因此，由于应用了模型，防止了过早选择和实行所提出的改良措施。下一步要做的是建立“序列模型”，即在一个连续的时期内，比较不同的管理行动的结果。

模型的灵敏度可以用模拟方法进行评估，即通过人为或从数学上改变输入的模拟方法。模拟决定输入与输出的比例，即当输入发生改变，会对输出产生多大影响?输入量是土地潜力张量矩阵中行的参数，人为改变参数的大小可以计算出对输出量(如家畜产量)的影响，这样，即可评估每一参数的灵敏度。

风险评价是模型最有效的用途之一，但实际操作并不容易。它往往受输入参数(如可否采集到)的影响，但输人参数获取后，就能够最有效地利用张量，将风险结果与管理效果结合起来。

景观中每一景观元素都需要不同类型的管理，侧重管理行动的模型通常需要鉴别的环境。

二、规划管理中的等级组织理论和 GIS

景观生态学的应用研究与地理信息系统(GIS)密切相关，因为 GIS 不仅是收集处理各种图件和数据信息的手段，而且作为决策支持工具在规划管理中是不可缺少的。用等级组织理论方法观察、分析和规划景观正是 GIS 模拟景观的过程。

(一) 德国的不同土地利用规划研究

Haber 等人针对德国人口密度高、土地利用需要满足多方面需求这一情况，提出了整体化规划的 5 个步骤。

1) 土地利用类型分析。辨识区域土地利用主要类型，由区域自然单位(RNU)(或景观)来划分。区域自然单位是由生境集合而成，构成了空间单位等级系统中的第三级。每一个 RNU 均有自己的生境特征组，常常形成可以反映土地用途的模型(表 15-1)。

2) 空间格局分析。土地利用类型空间格局的评价和地图绘制，以及每个 RNU 的土地使用类型的面积百分率。

3) 敏感性生境辨识。对近似自然区和半自然区的生境簇绘图并列出清单，这些生境被认为是对环境影响最敏感的地区和最具保护价值的地区。

4) 空间关系分析。对每一个 RNU 中所有生境类型之间的空间关系进行分析，特别侧重于连通程度以及不定向的或相互依存关系方面。

5) 影响结构评价。利用上述 4 个步骤得到的信息，评价一个 RNU 的影响结构，特别强调影响的敏感性和影响的范围。

表 15-1　主要的土地利用类型(排列顺序依自然作用降低或人工影响加强)

	自然成分和生物过程占主导
A 生物–生态系统	
A_1 自然生态系统	没有直接的人类影响，有自我调节能力
A_2 近似自然生态系统	受人的影响情况类似 A_1，人类放弃后没什么变化，有自我调节能力
A_3 半自然生态系统	A_1 和 A_2 类型的人类影响造成，但不是有意识创造的，在人类放弃后变化显著，有限的自我调节能力，需要管理
A_4 人工化(生命的)生态系统	人类有意识创造的，完全取决于人的控制与管理
B 技术–生态系统	
例：住宅区(村庄、城市) 交通系统 工业地区	人工化技术系统，受技术结构和过程控制。是人类为工业、经济和文化活动有意识创造的。取决于人类控制和周围的生态系统

从第一步开始就可以看出这个整体化研究是从环境影响的角度进行的。环境影响可以分为物质的和非物质的，也可以按接受影响的自然受体分为空气、水、土壤等等。环境影响的等级体系是根据介质的传输能力建立的，从整体上和危害的严重程度上看，空气传播危害最大，其次是水传播造成的影响，最后是土壤界面间的影响。另外，对景观结构的影响也十分重要，例如由于砍伐森林造成的影响。影响程度还与影响的传播路径

关系密切，需要分析这个路径是单行的还是网络的。

上述 5 步骤中采集的信息、数据，经计算机处理后转入地理信息系统(GIS)，并作为决策资料提供给管理部门使用。

Haber 等人在 1972 年运用这 5 个步骤进行工作，总结出了不同的土地利用(DLU)系统的规划和管理战略：① 在一个给定的 RNU 中，主要的土地利用类型不能变成仅有类型，其中至少有 10%~15%用于其他用途或生境类型，因此需要仔细考察环境影响的发生及敏感性。② 用于集约化农业和城市-工业用地的 RNU(或其主要部分)中，至少要有平均占 10%的面积作为自然生境加以保护，其中包括未受管理的草场和选择采伐的受管理森林。③ 主要土地利用类型必须多样化，应避免大块土地同质化，在人口密集地区地块大小不要超过 8~10hm^2，这一原则也适用于相同结构类型的城市或工业区。

DLU 战略已被德国的规划者和自然保护工作者接受，但由于涉及土地所有权等问题，在规划中应用有限而且进展缓慢。但 DLU 在乡村的重新规划和城市更新中起了重要作用。在那些景观空间结构与土地多种利用还比较协调的地区，DLU 战略延缓了土地利用结构的迅速变化。

(二) 等级组织理论在景观模拟中的应用

在上述景观规划研究中，研究者利用 GIS 处理信息。他们把有关立地的信息在计算机中合成重建时，产生了描述真实景观的图件，但它仅仅是一个静态模型，而对景观过程进行监测、预报，以便实行最优化的规划管理却是一个动态分析过程，这就需要建立动态模型进行模拟，这个过程也就是地理信息系统建立的过程。

一个系统要受到外部经济和生态输入的控制，它们对系统中的每个立地和生态系统都施加着重要影响。为了真正理解一个区域系统的动态过程，必须从对不同时空尺度下的状态进行推测入手。这个复杂的问题的解决可应用 Grossmann 提出的等级组织理论。

为了说明综合的、多层次的景观模型的结构及运行原理，可将它分为二大功能层：过程层和调整控制层。在研究过程中又发现，调整控制层还不能完全承担起整体研究的任务，因此进一步把调整控制层分为三层，对这 4 个观察层次描述如下：

1) 过程层。所研究的是真实景观。在这里能量、物质被加工处理，生物量被生产、消耗和分解。反映的是生态系统每天的真实情况，是一些能够观察、测定和计算的输入-输出过程。

调整控制层的 3 个子层自下而上形成渐尖的金字塔状，象征其内部的调整控制能力逐渐减弱而外部调整控制能力逐渐加强。

2) 底部调整层。是对真实过程的描述，与过程层联系最紧密、最直接。每一个具体的生态过程被很严格地控制着，数据比较容易获得，可以较准确地测定，并能大量获取。过程和相互关系是大量的，但它们大多呈简单的线性关系，尽管数量大，但结构清楚， 结果也是相对可预测的。该层的研究涉及生态系统的调查，如生物区系、土地利用、土壤侵蚀等，被输入地理信息系统，制作输入-产出平衡图，表达能量与物质的时空变化，并可进行统计运算。但该层的研究不能获得对各个生态系统的全面

了解，因为它仅仅涉及生态系统的每日常规运行。

3) 中部调整层。这层显示的是无规律和不经常发生的事件，如火灾、风暴、短时间缺水等。生态系统的长期运转取决于对这些事件造成的影响进行调整(或缓冲)，它揭示了大量相互连通的反馈环，其单位的数量比底层调整层少而连接性高得多，了解这一层的结构和动态是为了进行易于理解的模拟研究。一般来说，数据在这里被高度集聚了(如采用温度和能量的平均值)，而它对某一具体过程则可能是不准确和不适合的。这一层的预见能力较小，具有抽象性的不确定数据，并忽略似是而非的结构。从底部调整层推导出的指示组织和过程在这一层的研究中起了关键作用。

4) 顶部调整层。这一层最难开发。由于来自生态系统周围环境的外部影响十分强烈和不可预测，甚至可以反常地危及系统的生存，这一层作出的是战略性的反应，它高度不确定，很难预测。由于缺乏足够的数据，对基础结构也很难了解。基于结构的反馈方法已不再适用，更不用说实验方法了。这层的研究只能利用少量高度聚集的信息，精确性和可靠性低，指示的动态具有主观性，是理论性的思考。但对这一层的认识十分重要，因为抽象意义的系统是“系统生存的战略”，它包括长期的循环演替和适应(恢复能力)。如果所有的事件都是预知的，系统将失去应变能力。可见，强烈的、不可预测的反常事件可以使生态系统获得趋向于平衡和稳定的锻炼。

对景观进行四层等级组织分析可以认识并调整控制景观的机制，为规划和管理景观提供理论和方法。模型的不同层对真实景观有不同水平的描述，从静态到动态，从外部到内部，从具体到抽象，直至战略决策，不同层次解决不同等级的问题。景观模拟过程是依靠地理信息系统来支持实现的，所以它也是地理信息系统的建立过程。

顶部的战略方案和中层的反馈模式软耦联能对土地管理和环境影响做出切合实际的有预见性的建议。制作出的随时间而变化的系列生境图反映了动态变化，可以与实际发展相比较，如果不一致，则方案和反馈模型将被校正。

这种等级组织方法的程序已被成功地应用在德国 MAB 第 6 项研究中，以及运用在解决这些环境问题的工作中。例如关于假设的森林枯萎的实验，可以在不了解全部具体生境资料的情况下，建立中级水平的相互依存关系和反馈(包括空气污染物、土壤污染物等级、森林面积、树木密度等)。例如污染物使树木过滤作用降低乃至枯萎，而过滤能力的降低使空气中污染物浓度增加，这种正向反馈环不需要知道具体的污染物的性质，甚至可用于未知污染物。

(三) 利用地理信息系统进行景观规划管理

综合等级组织理论和系统分析为人们提供了一个认识景观的调控机制和制定人类决策的框架。这种方法与 GIS 景观模拟过程是一致的，说明了景观生态学研究与 GIS 有密切关系。景观生态学研究是按下述步骤进行的：首先把描述真实景观的各种专题图件和数据资料贮存在计算机里，建立起静态模型，然后通过数学统计等方法对这些资料进行加工和再生成，以图形和各种统计结果(如曲线等)进行输出；随后进入动态分析阶段，主要是用数学模型进行模拟，以预测各种现象(或过程)的未来发展趋势；最后将结

果进行高度概括，形成影响决策的若干建议。地理信息系统的意义和作用，是它能迅速、系统地收集、整理和分析各地区乃至全国的各种地理信息，通过数字化储存于数据库中，并采用系统分析、数理统计等方法建立模式，提供所研究地区的现状、历史和发展趋势的全面、系统的信息。所以它是决策的支持系统，是景观规划和管理中必不可少的手段。

景观生态学的多领域，不同方向研究的联系纽带是它们都涉及空间数据。地理信息系统(GIS)是一系列用来收集、存贮、提取、转换和展示空间数据的计算机工具。GIS 为研究景观空间结构和动态，尤其是物理、生物和各种人类活动过程相互之间的复杂关系，提供了一个极为有效的工具。GIS 在景观生态学中的应用大致包括以下几个方面：分析景观空间变化；确定不同环境和生物学特征相关性；确定镶嵌体大小、形状、毗邻性和连接度；分析景观中能量、物质和生物流的方向和通量；景观变量的图像输出；以及与模拟模型结合在一起的使用。GIS 主要从以下几个方面大大地促进了景观生态学理论和应用研究：① 将零散的数据和图像资料(如各类图表、航片卫片影像、记录)加以综合并存贮在一起，便于长期地、更好地利用；② 将各类地图(空间资料)和有关图中内容的文字和数字记录(特征资料)通过计算机高效率地联系起来，从而使这两种形式的资料完善地融为一体；③ 为经常不断地、长期地储存和更新空间资料及其相关信息提供了一个极为有效的工具；④ 为空间格局分析和空间模型提供了一个强有力又较容易操作的技术构架，从而有利于生态学家采用一些数学上和计算机方法上非常复杂的研究途径；⑤ 提高了某些景观资料的质量，大大增加了对资料的存取速度和分析能力，从而促进了景观生态学原理和方法在环境规划和资源管理诸方面的实际应用。

三、以国土最优化发展为目标的景观生态规划方法

前捷克斯洛伐克是一个国土面积小、人口稠密、高度工业化、城市化及旅游业发达的国家。针对这一国情，1971 年捷科学院组建了景观生态研究所，长期坚持用景观生态学思想研究区域规划和开发，根据生态信息和生态平衡原理对人工生态系统进行最优设计。在斯洛伐克科学院生态中心 Ruzicka 教授领导下，逐步形成一套比较成熟的景观生态规划的理论和方法，20 多年来已经成功地运用于实践。在对景观生态特征进行分析、解译和综合评价的基础上，评价理想景观的最优模式，提出景观开发和规划的建议，目的是使人类活动与景观之间达到统一和谐。他们的研究立足解决实际问题，又不放松基础研究，形成了有自己特色的理论体系，是景观生态学中较成熟、有代表性的流派，受到国际社会重视。

(一) 景观生态规划设计研究的基本思路与一般原则

1. 景观生态规划设计研究的一般原则

1) 整体优化原则。景观是由一系列生态系统组成的具有一定结构与功能的整体，景观规划与设计应把景观作为一个整体单位来思考和管理，达到整体最佳状态，实现优

化利用。

2) 异质性原则。异质性是景观的重要属性，景观空间异质性的维持与发展是景观生态规划的重要原则。

3) 多样性原则。景观多样性是描述生态镶嵌式结构的景观中生态系统(镶嵌体)的复杂性。多样性可以采用多度、均匀度、镶嵌度和连接性来描述。

4) 景观个性原则。每个景观都具有与其他景观不同的个体特征，即不同的景观具有不同的结构与功能，这是地域分异客观规律的要求。

5) 遗留地保护原则。即绝对保护原始自然保留地和宝贵的历史文化遗迹。

6) 生态关系协调原则。指人与环境、生物与环境、生物与生物、社会经济发展与资源环境、景观利用的人为结构与自然结构以及生态系统与生态系统之间的协调。把社会经济的持续发展建立在良好的生态环境基础上，实现人与自然共生，这是景观生态规划的重要目标。

7) 综合性原则。景观是自然与文化生活系统载体，景观生态规划需要应用多学科知识，综合多种因素，例如美学因素，满足人类各方面的需求。

2. 景观生态规划研究发展趋势

1) 生态系统及其空间相互关系的研究。包括一、二级景观结构，生态系统间的过程和相互关系，地区和沿线的能流。

2) 新技术的应用。包括计算机程序设计，数学方法和系统分析方法，遥感数据合成和判读，3S 的应用等。

3) 景观生态学模拟和规划的理论基础研究，景观复合体和区域体系分类理论，景观设计和规划理论等。

3. 景观生态规划的方法

1) 综合生态学研究和景观生态学(模拟)的理论和方法；

2) 景观生态学数据库方法，数据分析、解译和局部综合；

3) 景观生态数据的综合与评价；

4) 生态优化的土地利用分析；

5) 景观的保护和新景观的构成。

前捷克斯洛伐克的景观规划设计研究特别注意：自然资源的合理利用；建立国土规划中生态优化的景观结构与生态数据；建立有利于城镇居民的生活环境，使城市化发展与生态环境和谐一致；自然状态的转变与国家经济各部门的发展需求相协调；建立自然保护区，对包括生物遗传基因在内的物种进行保护。

（二）前捷克斯洛伐克的 LANDEP 系统发展概况及其基本内容

前捷克斯洛伐克景观生态学规划与优化研究(LANDEP)是在广泛分析综合的基础上提出的，是理论上的景观生态最优化利用。

1. LANDEP 系统发展概况

捷克斯洛伐克原为一个国家，最近捷克和斯洛伐克各自独立。前捷克斯洛伐克景观生态学和景观规划发展较早，并有突出成就。早在 1971 年，就成立了景观生态研究所。在斯洛伐克科学院生态中心，Ruzicka 通过 20 年的研究工作，提出了景观规划的 LANDEP 体系(图 15-8)。

LANDEP 强调评价景观时要将景观作为一个在自然现象和过程基础上的人类社会活动于其中的一个区域。LANDEP 包括两个基本部分：① 景观生态数据　这部分的核心是对非生物和生物成分进行调查和评价，对当前的景观结构、生态现象和过程以及人为活动对该景观的作用后果进行评定。它可分为分析、解释和综合(类型化和区域化)三个步骤。② 景观利用的最适化　这部分要建立在景观生态学数据的基础上，并且主要是针对生态学上同质的空间单元而言。因而，要将各空间单元与特定区域的要求和发展需要相比较。当将每一空间单元对一种特定的人为活动或土地利用的合适程度进行评定后，要根据景观生态学标准，对各种人为活动的最适宜位置提出建议。

所谓最适化，就是要将计划的土地利用项目安排在最合适的地方。要使选定的立地最低限度不受害，要与人为活动与自然条件矛盾最小。LANDEP 方法的基本点是，面临土地利用的各种要求，要以既定区域生态能力能够支持的土地利用项目而设计。为此，要回答三个问题：① 某一景观的生态性质是否适应土地利用的功能要求，也就是说，这类活动在既定区域可以发展到哪种程度；② 过去，在一个既定区域配置一种特定活动，对该区的生态特性影响如何；③ 某一景观当前的稳定性如何，是否平衡。通过逐步评价，我们可以找出：在一个既定区域，哪种活动在功能上起的作用最好；哪种活动从生态和经济前景来说是最适合的；哪种特定活动会对该景观带来危险以及采用何种措施来缓和这种危害。

2. LANDEP 的主要步骤

(1) 区域的景观生态和社会经济数据

1) 分析部分。最常采用的分析指标包括下述各方面：

① 划定规划区域的界线，这既可以是行政界线，也可以是天然界线；② 地质学基础；③ 成土母质，土壤和地下水；④ 地形(坡向，坡度、坡形)；⑤ 水文学，部分集水区的大小和形状；⑥ 气候条件；⑦ 潜在和实际植被；⑧ 动物区系的分析；⑨ 当前景观结构，分成六大类：森林和天然绿地、草地、耕地、裸露基质的土地、水域和水流、建筑和居民区，用这个分类去确定个别的空间单元；⑩ 与工业发展、城市发展、交通、农业、住宅建设、旅游、自然资源和自然保护有关的社会经济情况。

2) 综合部分。在 LANDEP 过程中，最重要的是划分生态学上同质的地面单元，这里称之为景观生态类型(无论在垂直和水平上，景观性质均不同)。综合工作的目的之一就是划分景观生态类型(并编号)。同质的景观生态类型地面是形成综合图的成分。综合的第二个目的是采用分析指标，对景观生态类型和规划区域的空间结构有一个详细说明。综合图对于以后的 LANDEP 过程来说是很重要的。在以后的 LANDEP 阶段，景观生态类型是最适化过程的基础，而每一景观生态类型的景观性质则进入决策过程。区域

是比景观更大的地理单元。

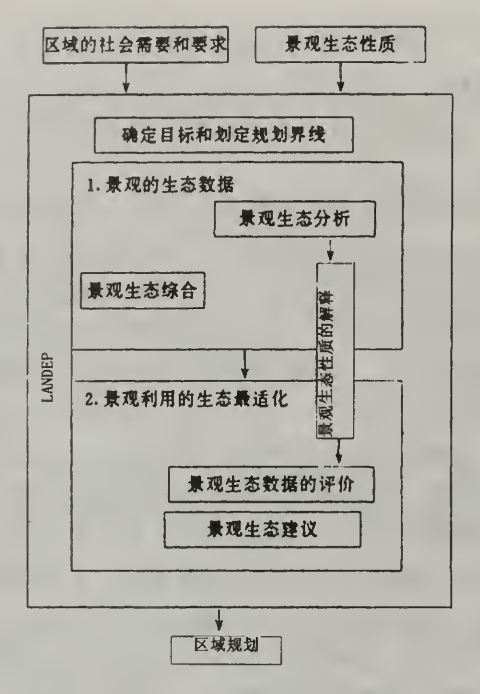


图 15-8　前捷克斯洛伐克的 LANDEP 系统概要(Ruzicka　1990)

3) 景观生态数据的解释。这里给解释下的定义是，将基本的景观生态学指标改变为便于最适化分析的过程。对基本生态学性质的解释可使我们从分析方法中获得一些景观的功能特征，它被称之为被解释的性质，包括有效性、可耕性、土壤肥力、基质的支持力、物质输送动态、植被变化、对建筑的适宜性等。

(2) 景观生态学最适化

最适化是 LANDEP 的核心。这里要将景观指标与选出的人为活动进行比较。内容主要包括评价和建议两部分。

1) 评价。评价包括三个步骤：① 确定加权系数；② 解释性质的功能适宜性；③ 求得每一景观生态类型对人为活动的总适宜性。对每一种人为活动，评价解释性质功能适宜性的标准有：实现某种活动在技术上的可行性；实现某种活动在经济上和地理上(如距离远近和位置)的可能性；实现某种活动对当地多方面的影响，其中也包括对特殊的景观生态学性质(如生物学平衡和生态学稳定性)的影响。总的适宜性是由它的各种功能适宜性的累积求出来的。

2) 提出建议。建议的目的要使景观的生态学性质与其社会发展相协调。提出建议也是一个过程。首先是初步选择，其次才是最后选择。上述评定过程的结果是一个既定的景观生态类型对一个既定的人为活动的适宜性做出决定，而建议这个阶段的任务则要对一个既定类型的最优活动做出决断。不过，起初要对每一种景观生态类型提出三种以上的替代建议，这时，要考虑如下一些特征：① 在一个既定立地上，现存土地利用类型(或方式)的适宜性如何；② 对一个既定类型来说，其他人为活动的适宜性如何；③

由现有土地利用改变为其他土地利用有无限制因素，有无改变可能，技术上是否可能。可见，基本要做的决策是对每一个景观生态类型，是维持现有的土地利用方式，还是要改变土地利用方式。对土地利用方式的改变还要考虑到空间特征，如一个同质地域的大小、邻区的性质、周围的构形等。

第十六章　全球变化生态学

第一节　全球变化生态学概述

一、全球变化生态学概念

全球变化(global change)一词首次出现于 20 世纪 70 年代，为人类学家所使用，当时国际社会科学团体使用“全球变化”一词，主要是表达人类社会、经济和政治系统愈来愈不稳定，特别是国际安全和生活质量逐渐降低这一特定意义。80 年代，自然科学借用并拓展了“全球变化”概念，将原先的定义延伸到全球环境，即将地球的大气圈、水圈、生物圈和岩石圈的变化纳入“全球变化”范畴，并突出地强调地球环境系统及其变化。90 年代以来，全球变化研究作为一项跨学科、跨国界、迄今为止规模最大的国际合作研究活动，已经成为最为引人注目和关切的环境和科学问题之一，被各国政府、科学界与公众所强烈关注。全球变化研究涉及范围广，包括地球科学、生物科学、环境科学、天体科学及遥感技术、地理信息系统及网络化高科技的应用等众多的学科领域。

全球变化是指地球生态系统在自然和人为影响下所导致的全球问题及其相互作用下变化的过程(蔡晓明　2000)。全球变化生态学(global change ecology)是研究全球变化的生态过程、生态关系、生态机制、生态后果及生态对策的科学。长期以来对全球变化的认识主要集中于全球气候变化、全球变暖或温室效应和海平面上升等，并以气候变化为研究核心。概括地说，目前的全球变化生态研究是关于区域及全球变化趋势、原因、机制和效应的研究。全球变化生态研究的目的在于探索由于人类活动所引起的全球环境变化对人类赖以生存与持续发展的陆地生态系统与人类生存环境的作用及其反应，以期找出应对的科学策略，最大限度地减小全球变化的不利影响，使地球朝着有利于人类生存与持续发展的方向发展。美国的《全球变化研究方案》一书中，将全球变化定义为：“可能改变地球承载能力的全球环境变化(包括气候、土地生产力、海洋和其他水资源、大气化学以及生态系统的改变)。”目前，国际上公认的全球变化研究，是由三个相互独立、相互依存的科学计划组成：以研究气候系统中物理方面问题为主的世界气候研究计划(World Climate Research Programme，WCRP)、以研究地球系统中的生物地球化学循环及过程为主的国际地圈生物圈计划(International Geosphere and Biosphere Programme，IGBP)和以了解导致全球环境变化的人类因素为主的全球环境变化的人类因素计划(International Human Dimension of Global Environmental Change Programme，IHDP)。

引起全球变化的根本原因在于全球性人口的增长，也包括人类对大自然的盲目开发

和破坏，社会体制、政策、法律的疏漏和失当。Vitousek(1994)研究表明，人类活动从以下三个方面引起全球变化：① N 循环的改变；② 土地利用和土地覆盖的改变；③大气二氧化碳浓度的改变。其具体机制是，人类的工农业生产很大程度上改变着大气二氧化碳浓度、N 循环以及土地覆盖，而这些变化最终将导致全球气候的变化和生物多样性的丧失(图 16-1)。同时也可以看出，全球变化研究成果将直接服务于人类，有利于工农业的合理布局、自然资源的合理开发利用、环境污染控制以及全球性环境问题的重大决策，为改善人类生存环境做出贡献。

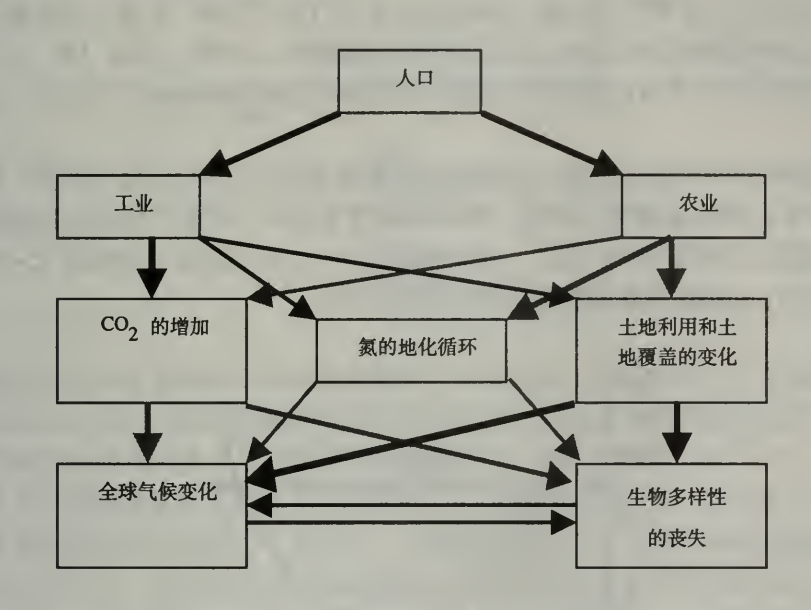


图 16-1 全球变化的原因及潜在结果(数据来自 Vitousek 1994)
(线条粗细以及颜色深浅表示作用的大小)

二、全球变化生态学的研究内容

(一) 土地利用和土地覆盖的变化

土地覆盖(land cover)是指陆地表面生态系统类型及其生物的和地理的特征，如森林、草地、农田等，而土地利用(land use)则是指对土地的利用方式(李博 1999)。对全球变化研究而言，土地利用变化是指人为土地利用方式的改变，以及反应土地利用目的的土地管理意图；而土地覆盖变化是指土地物理或生物覆盖物发生的变化，包括生物多样性的变化、实际和潜在的初级生产力的变化、土壤质量的变化、径流与沉积率的变化等。

土地利用和土地覆盖往往相互关联，它们直接改变着陆地生态系统的结构和功能以及区域乃至全球范围内的生物地球化学循环，同时可能影响区域范围内的能量和水分收入，从而影响区域的气候特征。因而土地利用和土地覆盖变化研究也成为全球变化研究的重要内容。

土地利用与农、林、牧业及城市交通建设密切相关，它包括森林的采伐、牲畜的放牧、土地垦殖、水体的利用、水生物的捕捞和城市扩张等。其结果是天然植被的破坏、地表的物理化学特性的改变，进而影响到微量气体的生物源和汇，改变了自然的生物地球化学循环，并通过各圈层的相互作用给人类的生存环境带来深远的影响。

（二）生物地化循环的变化

生态系统之间矿物元素的输入和输出以及它们在大气圈、水圈、岩石圈之间以及生物间的流动和交换称为生物地(球)化(学)循环(蔡晓明 2000)。过去 100 多年中，氮、磷、硫等物质的生物地化循环在人类的干扰以及气候变化的条件下已发生了显著的变化。

Vitousek(1994)的研究表明，全球自然固氮量每年约 130Tg(1Tg=10^{12}g)，其中陆地生态系统每年自然固氮量为 100Tg，海洋固氮量大约为 20Tg，而闪电引起的固氮量为 10Tg。化肥工业固氮 80Tg 之多、农作物固氮 30Tg 以及其他工业释放 25~30Tg，总计达 135~145Tg 而超出自然固氮量(130Tg)(图 16-2)。

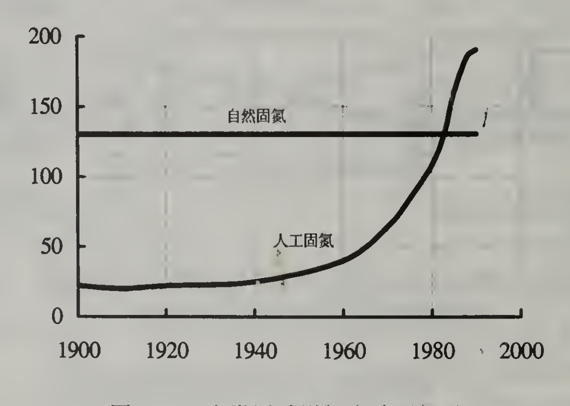


图 16-2 人类活动增加全球固氮量

不仅如此，人类活动如植物秸秆燃烧、土地利用和湿地排水等都已加速了氮库的游离，游离的氮均可回到大气或水域中，影响了水质，从而改变局部地区氮循环。同样，人类活动也改变了硫、磷的生物地化循环，产生酸雨以及使水体的富营养化。

（三）人口增长

人口增长是全球变化中一个重要方面。人口剧增是全球变化的一个主要原因。自地球上出现人类直到 1945 年，经过上万个世代，人口增加到 20 亿，1962 年为 30 亿，1980 年为 44 亿，预计到 2032 年将达到 90 亿(图 16-3)。世界各地区或国家的人口增长率是不相同的，非洲和拉丁美洲是人口增长最快的地区，其次是亚洲。近几十年来，发展中国家的人口增长率一般都比发达国家高。众多人口给全球生态系统施加了巨大压力，人类活动正在改变着世界的运转方式，而且人类工农业活动以及对自然资源的耗费

将对全球变化造成巨大的影响，人类正在改变着地球。

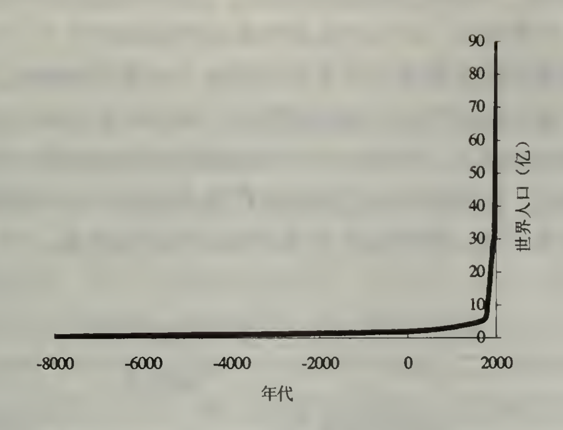


图 16-3 世界人口发展趋势(引自 Gore 1977)

(四) 生物多样性丧失

生物多样性的丧失是全球变化的重要成分。事实表明，随着全球人口的激增、人类经济活动的加剧，作为人类生存最重要基础的生物多样性也受到最严重的挑战。研究表明，物种灭绝的速率是人类干预出现之前自然速率的 1000~10 000 倍(Wilson 1987)。更为严重的是生物多样性的丧失是不可逆转的，一个物种一旦消失，就永远不会再现。

在全球变化的研究中发现，土地利用、生物地化循环、人口的增长等都影响到生物多样性的存在和丧失，而生物多样性的变化也反过来影响着陆地和海域生态系统的结构和功能，从而影响全球的土地利用变化、物质生物地化循环变化、全球气候变化等(蔡晓明 2000)。因而，Vitousek(1994)和 Mooney 等(1994)在许多全球变化的研究项目中已把生物多样性的丧失作为重要内容。

(五) 全球气候变化

温室气体浓度逐渐升高，已成定论。但温室气体将导致气候发生什么样的变化？科学家已建立了多种模型预测气候的变化。这些模型都是基于大气环流理论之上，统称为 GCM(General Circulation Model)，包括 UKMO(UK Meteorological Office)模型、GISS(Goddar Institute of Space Studies)模型、NCAR(National Center for Atmospheric Research)模型、GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Lab)模型、OSU(Oregen State University)模型等。这些模型都假定二氧化碳浓度到 2030 年加倍。尽管各种模型预测结果在量上有差别，但变化的趋势基本是一致的(表 16-1)。随着二氧化碳浓度的加倍，全球大气和土壤的温度将升高 1.5~4.5℃，这种温度变化是逐渐的，受海洋水体的影响，大约每 10 年升高 0.3~1℃。温度变化幅度地区性差别较大，在高纬度地区(北纬 60°以上)，夏季温度升高幅度将比全球平均水平高 50%~100%(升高 4.5~6℃)，而冬季温度升

高幅度可能是全球平均水平的3 倍(升高 8~12℃)，这主要由海洋中冰的溶解放热造成。

由于全球气候变暖，水分蒸发量必然增加，这将导致全球平均降雨量增加(表 16-1)，但雨量增加也是不平衡的，高纬度地区和极地增加幅度较大，且季节变化较大。在高纬度地区，因为高蒸发量土壤水分在夏季将减少，在冬季则增加。而在中纬度地区，雨量也有所增加，但由于温度升高，蒸发量加大，积雪溶化提早，雨季也提前，故夏季也将更加干燥，土壤水分减少，内陆干旱矛盾可能在某些地区更为突出。雨量增加的地区性差异和季节性变化，在某些地区可能导致严重的洪灾。不少研究结果都支持这一观点， 但究竟哪些地区更干旱，哪些地区发生涝灾，尚难以定论。

表 16-1　2050 年气温和降水量的变化

GCM	预测结果	
	全球平均增温 /℃	全球平均增雨量 /%
OSU	2.8	7.8
GFDL	4.0	8.7
GISS	4.2	11.0
UKMO	5.2	15.0

引自 Watson et al.　1996

(六) 大气成分变化

近半个多世纪以来，由于全球人口数量的增加，人类经济活动的增强和现代工业的发展，人类社会对能源消耗量越来越大，矿物燃料的大量使用和森林面积的不断减少，导致大气中的二氧化碳和甲烷、氧化亚氮和氟氯烃类化合物(chlorofluorohydrocarbons，CFC)等气体的浓度在明显升高(张新时　1994)。这些气体具有可使大气温度升高的温室效应(effect of green-house)，称为温室气体(green-house gas)。温室气体浓度的升高，将使全球气候发生显著的变化。这种变化将对生态系统的结构、功能及分布产生重要影响，同时会扩大和加深物理反馈过程，比如地球物理学过程(水分蒸发、反射率等)、热力学过程(大气循环、洋流和气体的溶解性等)、生物地球化学过程(甲烷的氢代谢、陆地和海洋有机物的生产和分解等)，另外，还会对人类活动产生作用。

表 16-2　主要温室气体的特点

温室气体	CO_2	CH_4	N_2O	CFC
工业化前的浓度　(μl/L)	280	0.8	0.288	
现在(1990)的浓度 (μl/L)	353	1.72	0.31	0.0002~0.0003
年均增加 %	0.5	0.9	0.25	4
时间 /a	100	10	150	65~130
吸收辐射能力(相对于 CO_2)	1	32	150	>10 000

研究证明，在过去的一个世纪中陆地和海洋温度增加了 0.3~0.6℃，其中最近 10 年增加速度最快。在温室气体中，二氧化碳对温室热效应作用最大占 56%，尽管其他气体

对热辐射吸收能力大大高于二氧化碳，但由于其浓度基数低，作用较小(表 16-2)，总的对热效应的作用占 44%，其中甲烷占 11%，氧化亚氮占 6%，CFC 占 24%，水气占 3%。

二氧化碳浓度在过去的近 200 年中增加了 25%，年均增加 0.5%。现在的增加速度更快，在美国夏威夷 Mauna Lao 的长期观测记录证实了这一点(图 16-4)，多种模型预测，到 2030 年大气中二氧化碳浓度将加倍，大气中二氧化碳浓度的增加主要是由于工业燃料燃烧量迅速增加，同时也因为森林植被及林下土壤碳库中碳的分解释放而造成的。全球森林植被和土壤中贮藏的碳是农业生态系统碳量的 20~100 倍(张新时 1994)。在温带和热带地区，由于大量森林被砍伐，在 1850~1987 年间，以 C 计大约有 115Gt($1Gt=10^{15}g$)被释放到大气中。近些年来，热带地区森林破坏速度加快，该地区以 C 计年均释放 1~2.6Gt，其中 0.2~0.9Gt 来自林下土壤。工业燃料释放的二氧化碳在 1850~1987 年间以 C 计约为 200Gt，第二次世界大战后，其增加速度非常快，现在以 C 计年均释放 5.7~6.0Gt。与能源有关的二氧化碳释放量在全球各地是不均匀的，在北美、西欧和前苏联地区释放量较大(图 16-4)。

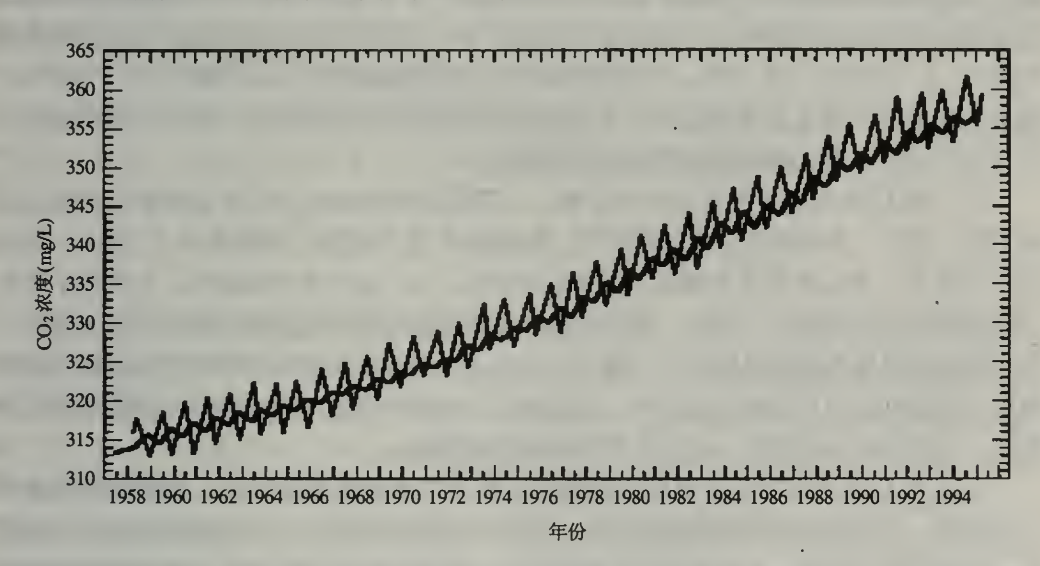


图 16-4　美国夏威夷 Mauna Lao 观测记录的 CO_2 浓度变化

甲烷浓度自从 1860 年至今，已增加一倍以上。其来源主要是工业源、湿地、水域、稻田、农田中的有机肥、有机物质燃烧等。CFC 则完全是工业化的产物。在温室气体中，由于二氧化碳浓度增加速度大大加快，各种研究证明在以后的 30 多年内，二氧化碳浓度将达到工业化前的两倍 。因此，影响全球气候变化的主要气体是二氧化碳。

第二节　全球变化产生的影响

一、全球变化对农业的影响

农业生态系统是一种受人类强烈干预的人控系统，也是自我调节机制较为薄弱的生

态系统，是全球气候变化的主要承受者和受害者。已有不少研究表明，全球变暖对农业的影响既有不利方面，也有有利方面，它给农业带来的机会与挑战兼而有之。

(一) 二氧化碳浓度对农业的影响

1) 二氧化碳浓度对光合作用的影响。二氧化碳是作物光合作用的原料，对作物生长至关重要。在一定的范围内，二氧化碳浓度升高，植物生长加快，所以有人认为大气中二氧化碳浓度升高，将会大幅度提高植物的生产力。但也有实验表明，许多植物在高二氧化碳浓度下有一段时间加速生长，之后生长缓慢，甚至停止生长(匡廷云 1994)。这可能是与植物的不同光合代谢途径有关。C_3 植物(如小麦、水稻、大豆等)对二氧化碳浓度升高呈较高的正反应，但 C_4 植物(如玉米、高粱等)对二氧化碳浓度增加的反应较弱。在其他条件不变的情况下，二氧化碳浓度升高，对农作物是有利的，但气候变化会导致一系列生态因子的变化。实验研究表明，大气中二氧化碳浓度加倍，主要分布于温带、亚热带和湿润热带地区的 C_3 植物会受益增产，而主要分布于半干旱热带(非洲)的 C_4 植物产量则会受到影响，并且前者的受益并不一定能补偿后者的损失。在全世界粮食产量中，C_4 作物仅占到 20%，但在国际市场上交易的粮食中，C_4 作物占到 75%以上。如玉米在国际市场上交易量最大，其是全球饥困地区的主要食物。因此，气候变化对 C_4 作物产量的影响，将会使某些地区饥荒加剧。

2) 二氧化碳浓度对作物品质的影响。二氧化碳浓度的升高可能会导致农作物品质的下降，因为二氧化碳浓度高的情况下，作物吸收 C 将增加，而吸收的 N 减少，体内 C/N 比升高，蛋白质含量将降低，作物品质降低。这一点已有实验证实：大豆和小麦在二氧化碳浓度倍增条件下实验，结果大豆氨基酸和粗蛋白含量分别下降 2.3%和 0.83%；冬小麦籽粒粗蛋白和赖氨酸分别下降 12.8%和 4%。这样人类人均需求的粮食量可能要增加，才能满足自身的营养。同样，农业害虫可能也要摄取更多的植物才能满足其营养需求，虫害可能由此加重。这方面尚无实际研究数据。

3) 二氧化碳浓度对水分有较大的影响。由于二氧化碳浓度升高，植物较容易获得二氧化碳，因此气孔开放程度将变小，开放时间也可能缩短，这样植物蒸腾作用将减弱，植物体耗水降低，土壤水分利用率将提高，这对于干旱半干旱地区的农作物可能是有益的。但由于温室效应，二氧化碳浓度升高，气温也升高，水分蒸发速度会加快。这种蒸发加快和蒸腾减少是否能达以平衡，目前尚难以预料。有人认为总体耗水可能增加，起码在某些区域可能是这样。

(二) 气候变化对作物布局和面积的影响

温室效应会使大气温度升高，这样对热量有限的地区来说，可以延长生长季节，这一趋势有着极地化和高山化的发展倾向，在北半球高纬度地区这种变化可能是明显的。就像前面讲的植被地带会因气候变化而北移一样，农业区也会大幅度北移，因热量不足而分布区受限的作物的分布北界也会大幅度北移，山地分布上界会向上移动，这样中纬

度和高纬度地区的作物布局和面积将会发生较大的变化。这方面已进行了不少的模拟研究。一些研究表明，在北半球中纬度地区，若平均气温升高 1℃，作物的北界一般可以向北移动 150~200km，而海拔向上移动 150~200m。对冬小麦和玉米的分布区变化问题已有多人做过研究。

在欧洲现在的气候条件下，玉米作物(指要收获成熟种子的玉米，不包括只收青穗的玉米)需要气温≥10℃的天数 850 天，其分布北界位于英格兰的南部。当大气中二氧化碳浓度加倍后，研究认为，其北界移至莫斯科的南部，有的模型预测北移幅度更大。

同样的研究也对北美的冬小麦区进行过分析，GISS 大气环流模型预测结果认为，二氧化碳浓度加倍后，冬小麦区从美国大平原区北移至加拿大，而春小麦区也同样大幅度北移。在墨西哥，小麦区面积将没有什么变化，但研究认为可能会出现持续高温天气，而对小麦生产不利。

尽管不同模型预测结果有异，但其趋势是一致的，也就是说在二氧化碳浓度升高，气温增加的情况下，一些作物分布北界要向北扩展，面积可能增加。按常理，这些作物的总产量应增加，但这必然要将一些其他用途的土地转为农田，比如原来因热量不足不宜作为农田的草地、林地等要开垦，这样在作物产量增加的情况下，林产品和畜产品可能会减少，为人类提供的总产品是否增加，尚是问题。

由于农业带北移而增加的农作物面积在不同的区域或国家相差悬殊，而且受政策影响甚大。所以，作物格局在未来几十年中究竟如何变化，难以确切预测。

(三) 气候变化与农业气候灾害

对农业影响最大的可能是极端气候条件，比如干旱、风暴、热浪、霜冻等，全球气候变化，对这些气候灾害发生的频率和强度有什么影响，目前知道的甚少。某些研究认为，气候变暖会使热带风暴增强，从而对低纬度地区，尤其是海岸线上的农业有重大影响。有人认为，气温升高，大气热浪将会频繁发生，从而影响农业生产，在热带、亚热带地区更为突出。像冬小麦主产区的干热风可能会使小麦大幅减产。由于气温升高，大气层中气流交换增强，大风天气会增加，风暴频率和强度都会有所增强，某些区域(如我国黄土高原地区)风蚀作用导致水土流失会加剧，从而影响农业生产。再则温度升高，会使某些要求低温春化阶段的作物受到一定的影响。还有人认为，大气温度升高后会导致土壤耗水量加大，尤其是植被覆盖度低的干旱和半干旱地区耗水量会更大，旱灾会更严重地发生而威胁农业的发展。这些方面的影响程度尚难确切估计。

(四) 气候变化与农业病虫害

就像植被地带和农作物带北移一样，全球气候变暖会使农业病虫的分布区发生变化。低温往往限制某些病虫害的分布范围，气温升高后，这些病虫害的分布区可能扩大，从而影响农作物生长。同时温室效应还使一些病虫害的生长季节加长，使多世代害虫繁殖代数增加，一年中危害时间延长，作物受害可能加重。分析表明，在美国对豆类

等作物严重危害的害虫——马铃薯叶蝗，当气候变暖时，越冬虫口密度加大，假定作物种植时间不变，其危害时间提早，这可能导致作物大面积受害。玉米螟对豆类的危害也会因提前取食而加重。另外，在温带地区某些病虫害目前危害程度不大，但如温度升高，危害会加重，比如马铃薯枯萎病由于目前夏季气温较低而对马铃薯危害不大，但当平均气温升高 4℃时，马铃薯会因此病而损失产量 15%。全球平均雨量的增加和平均湿度的变化会对病虫害及它们的天敌发生什么影响，目前尚不知。温度和水分变化很可能导致害虫种间及它们的天敌种群间相互作用关系发生变化。

(五) 海平面升高对农业的影响

全球气候变暖会使海平面逐渐升高，这是因为极地和高山地区的冰川、冰盖和积雪融化所致，温度升高幅度的极地化使其融化加剧，再一原因是海水水体受热膨胀。海平面升高已被近年来的观察实验所证实。海平面升高，沿海岸线一些地势低下的农田可能会被淹没，同时会造成周围盐化土壤扩展，海潮、海岸侵蚀和海浪灾害会加剧。如果海平面升高 1m 全球可能会有 11 800 万人民受到灾害威胁。有人预测，到 2100 年海平面平均升高 1~1.5m，到时埃及会损失 1%土地，而孟加拉国损失最大，可能达 17.5%的土地，另外中国、丹麦可能是损失较大的国家。目前对海平面升高幅度预测的结果尚难一致， 相差较大。

气候变化对农业的影响是多方面的、复杂的和难以准确预测的，有有利的作用，也有不利的影响，并且可能是负作用大于正作用。依 IPCC 的评价结果，气候变化对农业的影响强度是小到中等程度。全球粮食生产受气候变化影响的损失可能与由于技术的提高而增产的粮食相平衡，即全球粮食总产可能变化不大，但区域间的差异可能是明显的。农业生态系统是很复杂的，其对气候变化的响应也是难以确切模拟的，农业又是与人类关系最为密切的产业，所以气候变化与农业系统间的相互作用关系研究是非常重要的。 目前对全球气候变化的实验和预测研究主要集中在温室气体的产生过程与机理；大气中温室气体的变化史及其浓度变化预测；温室气体浓度升高对气候影响的程度和区域差异；气候变化对海洋和冰川的影响等方面。在气候变化对农业生产的影响方面，对个体作物与二氧化碳的关系研究较多，而对农业系统整体研究较少，这方面尚需进一步加强。主要研究内容应包括以下几方面：① 农业生态系统变化趋势研究；② 农业生态系统变化机制研究；③ 全球变化的农业后果研究；④ 农业技术改进和发展模式对全球变化的适应性研究；⑤ 全球变化条件下农业生态系的监控研究；⑥ 全球变化的农业对策研究等。

二、全球变化对土壤的影响

(一) 土壤 C 库和 C 流的变化

土壤是一巨大的 C 库。全球有机质含 C 量约在 1300~1600Gt，是陆生生物含 C 量

(664Gt)的两倍。地球陆生植被总初级生产量以 C 计约为 120Gt/a，其中 50%用于植物呼吸，另外 50%(净初级生产量)，主要由土壤生物呼吸分解，呼吸分解产生二氧化碳返回大气，也有少量的以甲烷的形式返回大气(Lashof　1989)。在气候条件保持稳定的情况下，土壤 C 库(C pool)和 C 流(C fluxes)基本保持平衡。但在气候变暖的情况下，也有较大的变化。

(1) 全球土壤 C 库的组成和分布

全球土壤 C 库的组成和分布是不均匀的，其与生态类型密切相关，受大气候的制约。图 16-5 是主要地球生态系统土壤 C 库的含 C 密度。该图根据 Holdridge 生命带原理，以 1m 深土层含 C 量为准绘制而成。图的左右两条三角形边分别代表潜在蒸发系数(PER)(potential evaperation ratio)和降水量，底边为含 C 密度，图中黑线为等值线(isocline)。土壤中 C 库含 C 量主要与土壤温度、土壤水分、蒸发量以及它们的季节变化有关。这些因素直接影响着植被的生产能力，即影响土壤系统 C 的输入量，也影响着土壤生物的活动，也就是影响 C 的输出量。像广大的冻原地区，生物生产量虽然很低，但由于寒冷分解受到限制，其土壤含 C 密度最高；其次是沼泽(bog)、湿地(wetland)等生态系统，因水分过多限制了分解。Svensson 和 Rosswall(1984)研究表明，这些生态系统每年约有 30%~40%的净第一性生产量被贮存在泥炭(peat)层中。北方森林的净生产力为 200~300g/(cm^2 · a)，其周转时间(turnover time)需 25~40 年；而热带雨林(tropical rain forest)净生产力是 930g/(m^2 · a)，但其周转时间为 0.9 年，说明土壤条件及其季节变化是影响土壤含 C 量的重要因素。

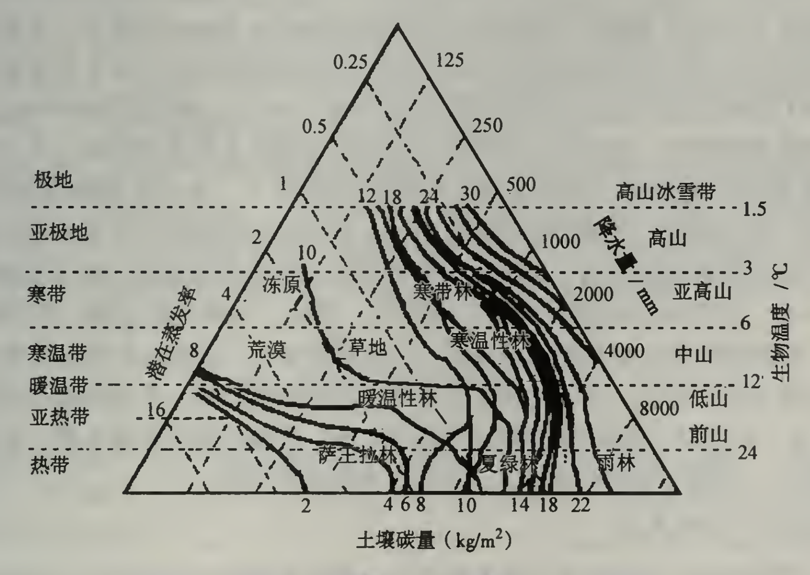


图 16-5　不同生态系统土壤中碳的含量(引自 Post et al.　1982)

一些研究表明，二氧化碳加倍，气候变暖对不同生态系统的含 C 密度影响不十分明显，即生态系统 C 密度大小排列顺序基本保持一致。但由于气候变化，植被地带要发生变化，不同生态系统的界线和面积将有较大的改变，各生态系统土壤 C 库中的总 C 量将有较大的变化。在大气中二氧化碳浓度升高的情况下，植物光合速度会相应提高。由

此，各生态系统中的生物生产能力也会提高，进入土壤的生物量可能会增加，也就是说进入土壤的C量会增大。但由于二氧化碳浓度升高的同时，温度也会升高，土壤中的有机物分解速度将加快，这样土壤C的输出量也将增加。对同一生态系统而言，单位面积内土壤C库储存的C量受光合作用影响较小。所以，影响各生态系统土壤中C量的主要是其面积的变化。各生命带在气候变化影响下，都有向北移动的倾向，因此，面积变化最明显的将是冻原地带和北方森林带，预计它们土壤中C的总量将有明显减少，而某些生态系统的C总量，比如温带草原将有所增加。生命带的变化滞后于气候的变化，土壤C库中C总量的变化则滞后于生命带的变化，滞后期可能超过100年。

(2) 气候变化对土壤二氧化碳释放的影响

土壤向大气释放的二氧化碳主要是土壤C库中有机物质矿化作用(mineralization)产生的，也叫土壤呼吸(soil respiration)。土壤呼吸量的大小与生态系统中枯枝落叶的生产量直接相关，沿纬度形成明显的梯度。当然释放的二氧化碳部分来源于根系呼吸(root respiration)，不同生态系统根系呼吸量所占二氧化碳释放总量的比例不同，森林土壤中根系呼吸量可达50%，而草地一般占20%~30%。土壤呼吸和根系呼吸都与温度和水分有密切关系。

温度对土壤微生物呼吸的影响一般用Q_{10}函数关系表示，即温度增加10℃，微生物呼吸作用增加的倍数，通常$Q_{10}=2$，但在不同的生态系统中Q_{10}值不同，在温暖的地区Q_{10}值较低，而在寒冷地区Q_{10}值则较高，比如在暖温带落叶阔叶林中土壤呼吸$Q_{10}=2$，但在冻原生态系统中$Q_{10}=3.7$。尽管Q_{10}不同，但温度和土壤呼吸的相关关系是明显的。Pesterson 等(1975) 发现在冻原和亚极地森林(subpolar forest)土壤中，土壤呼吸与温度有线性关系；Moore (1981)研究认为北方森林和冻原有机质的分解主要受低温限制；Heal 等(1981)发现排水良好的冻原和泰加尔林(Taiga forest)土壤微生物的呼吸在-5~25℃范围内与温度直接相关。温度对土壤呼吸的作用受土壤水分含量的影响，水分过多的情况下，会限制温度的作用，同样土壤水分偏低的情况下，也会限制温度的作用。因此，在沼泽、积水冻原、湿地等生态系统中，土壤呼吸与温度的关系是非线性的，但在广大的温带地区的森林和草地，土壤呼吸很少受到土壤水分的限制。在干旱地带的草地和荒漠(desert)，增加水分则明显加快土壤呼吸。因此，全球气候变暖、平均降水量增加，会使土壤微生物和土壤动物活动加剧，土壤呼吸加快，这就必然导致全球土壤C库释放二氧化碳速度的加快，尽管各种生态系统加速的幅度不同，但趋势是一致的。这样将影响C流，会出现土壤中C的输入和输出失衡，即输出量大于输入量，逐渐引起土壤有机质缺乏，致使土壤贫瘠化，其长远效应可能是严重的。

(3) 土壤中甲烷的产生

土壤中甲烷的产生主要决定于两个条件，一是厌氧条件(anaerobic conditions)，即丰富的水分；二是C源，即丰富的有机质。淹水的土壤生态系统是大气甲烷的主要来源，比如沼泽、湿冻原、湿地等。在厌氧条件下，矿化发酵(fermentative mineralization)产生甲烷。温度直接或间接地影响其矿化速度，即影响甲烷的产生量。甲烷一般产生于10cm 深的泥炭层上层。研究表明，甲烷的产生量在空间和时间上变化很大，主要决定于土壤条件、地形、植被覆盖度等因素。对阿拉斯加淹水的冻原草甸(tundra meadow)研

究表明水深度与甲烷释放量有对数线性关系。

在气候变暖的情况下，全球土壤甲烷的产生量可能增加。除自然生态系统外，大面积的农业生态系统，尤其是稻田也是甲烷的重要来源。由于全球温度升高，各种作物的北界要向北发展，稻田等作物面积要增加，因此，甲烷的释放量将会加快。

（二）气候对枯枝落叶分解的影响

土壤枯枝落叶层(litter)的分解速度决定于温度和水分等气候条件对微生物的影响，当然也受土表微气候、微地形、积雪和植被覆盖程度等的影响。枯枝落叶的成分与其分解速率密切相关。一般地讲，温度和水分条件适当，枯枝落叶含 N 和营养成分较高，适于微生物利用，则分解速率较高。如果枯枝叶含木质素、树脂较高，而含 N 较少，分解速率就较慢。这方面已做了大量研究工作。在草本植物群落中，不少学者用含 N 量或 C/N 作为枯枝叶分解速率的预测指标；在木质素较高的枯枝落叶中，一般用木质素 C/N 比作为预报指标。但在极端的环境中，这些预测指标有例外，不一定起作用。

气候对枯枝落叶分解的作用是十分明显的。有人用 ^{14}C 标定黑麦草(ryegrass)进行枯草分解实验，实验在不同的气候条件下类似的土壤中进行。结果表明其分解曲线的形状是一致的，但同样的分解量(物质损失量)在尼日利亚(年均温 26.1℃)分解速度是在英国(年均温 8.9℃)的 4 倍，在南澳大利亚也是英国的 2 倍。类似的实验也在欧洲松(*Pinus sylvestris*)林中做过，将松针装入不同的分解袋中，置入欧洲西北部不同的气候条件下的松林中，其年均温变化于 1~9℃之间，年降水量 500~1000mm，共设 16 个点，三年实验结果表明松针分解速率与年均温呈非常显著的正相关，与年蒸发量关系也十分密切。Dyer 等(1990)在北方森林、温带森林做的研究，也证明年蒸发量与分解速率有密切联系，他解释说，蒸发量是温度和水分可利用性的综合反映。

在气候变暖，全球平均降水量增加的情况下；全球枯枝落叶的分解速率会加快。因二氧化碳升高，光合速率提高，生产力增加，输入到土壤中的枯枝落叶量会增加，但因温度效应，留存于土壤中的枯枝落叶总量相对减少，在海拔较高的山地和高纬度地区，土壤中总枯枝落叶留存量减少更明显。但这方面的实验模拟研究尚不多见。

（三）气候变化与土壤 N 动态

自然土壤中的 N 主要来源于枯枝落叶和动物尸体，也有少量来源于大气(通过降雨)和生物固 N。土壤 N 的输出主要是土壤中的有机质分解，分解后大部分被植物吸收利用，部分氨气经过硝化(nitrification)、反硝化(dinitrification)或挥发(volatilization)以气态释放到大气中。这些过程受温度、土壤水分、植物特征等影响甚大，因此，间接地受二氧化碳浓度的影响。

在无干扰的生态系统中，N 的输入和输出是平衡和稳定的。但在气候变化的情况下，植被覆盖度、枯枝叶输入量、土壤条件都会受到影响，从而影响土壤中有机质的分解和稳定，影响 N 的动态(N dynamics)。

当森林生态系统破坏变为农业生态系统后，其土壤有机质和营养物质迅速流失，这方面已做了大量研究。一般林下 0~30cm 的土壤中，砍伐开垦后有机质减少 20%~60%，由此 C 和 N 库均迅速减少。其流失过程与气候和土壤类型密切相关。在热带森林中，砍伐后 3 年内，土壤有机质减少 7%~54%；温带森林中减少 20%~50%。如果砍伐后让其自然恢复演替，森林土壤中有机质 10 年后开始逐渐回升；若改为农业生态系统则持续下降，土壤会越瘠薄。对草地生态系统破坏后，其有机质和营养物质的流失与森林生态系统趋势是一致的。

土壤中有机质的稳定性与有机质的性质有关。有的学者根据土壤中有机质的分解时间长短将土壤有机质分为活性有机质(active organic matter)，其一般在几年内分解；低活性有机质(low active organic matter)可以在几十年内分解和非活性有机质(passive organic matter)，其需要几百年才能完成分解。活性有机质很易被土壤微生物利用，一般为植物的代谢物质；而低活性和非活性有机质一般阻止微生物分解，多为植物的结构物质。另外，土壤中有机 C、N 的稳定性与土壤结构也有密切关系，主要是与黏土粒(clay)的含量有关。Oades(1988)在钙质土(calcareous soil)中做实验发现土壤有机 C 含量与粘土粒比例呈显著正相关，在黏土粒含量达 42%的情况下，土壤有机 C 和 N 基本稳定不变，8 年之内有机质基本没有分解；在黏土粒含量为 12%时，其土壤有机 C 逐渐下降，8 年后下降 30%；而土壤粘粒为 5%时，8 年后土壤有机 C 下降近 50%。这是因为黏粒的多少直接影响土壤的通气性，从而影响微生物的活动所致。

氧化亚氮在土中形成于反硝化过程中，以 N 计自然土壤一般每年向大气释放氧化亚氮 6Mt/a，农业生态系统每年释放氧化亚氮 3.5Mt，二者加起来是全球释放于大气中 N_2O 量的 50%；另外土壤还向大气释放大量的氮氧化物，其占总释放于大气中氮氧化物的 25%。许多土壤环境因素，比如土壤温度、土壤水分、土壤通透性等都影响含 N 气体的释放，影响土壤的 N 动态。在气候变化的情况下，全球土壤有机 N 库贮量也将减少，这同土壤 C 动态变化相一致。但在不同的生态系统中，其变化是不平衡的。这同样是受到土壤有机质输入和输出量变化的影响。

（四）气候变化对土壤生物多样性的影响

气候变化可能影响土壤微生物和土壤动物的多度、分布等，从而影响土壤生物多样性(soil biodiversity)。这方面的影响目前还不能确切地预测。但是森林砍伐开垦为农业生态系统无疑损失大量的土壤真菌(soil fungi)和土壤动物。在热带、温带、寒温带等地区，大面积的森林被破坏，其土壤贫瘠化，土壤生物多样性受到很大损失。在大气二氧化碳浓度升高，气候变暖的情况下，地面植被的光合、生物生产的质和量要发生变化，因此，输入到土壤的有机物的质和量也会受到影响，从而影响到土壤微生物和土壤动物的种类组成。实验研究表明土壤微生物群落种类组成与其土壤所含的植物枯枝叶的种类密切相关。不同的生态系统类型土壤中的生物多样性受气候变化影响的程度是不同的，但对各种生态系统类型做出确切预测，尚有困难。

气候与土壤的关系是十分复杂的，因此，气候变化对土壤的影响和土壤对气候变化

的反馈作用也是十分复杂的。目前对全球气候变化的实验和预测研究主要集中在温室气体的产生过程与机理、大气中温室气体的变化史及其浓度变化预测、温室气体升高对气候影响的程度和区域差异、全球气候变化对海洋的影响、全球气候变化对冰川的影响、气候变化对农业生产的影响、气候变化对地球生命及生命带的影响等方面。对土壤和气候变化的关系研究相对较少，因为土壤系统是十分复杂的，许多因素难以模拟。对于土壤与气候因子之间关系的研究做的工作较多，尤其是对森林土壤研究的较多，这些研究主要集中在土壤系统的生物物理和生物化学过程与机理及其气候因子对其的影响上，这些是理解气候变化对土壤影响的基础。由于土壤系统对外界的干扰和影响的巨大缓冲作用，土壤对气候变化的反应有相对较长的滞后期，因此，气候变化对土壤影响的研究尚未引起高度重视。但土壤系统是林业、农业、畜牧业等的基础，它的变化直接影响着地球生命和人类自己，对它的模拟和预测研究有非常重要的意义，这方面研究尚需加强。

三、全球变化对植被的影响

全球变化是一种过程缓慢、范围广泛且影响深远的环境变化，其中以气候变化最为突出。气候变化的趋势是全球气温升高，降水分配在时间和空间格局上的变化，以及灾害性天气可能增加。

全球植被是大气候长期作用的结果，如果气候发生较大幅度的变化，必然会反映到植被上，也就是说气候变化会对植被产生重要影响。

（一）植被的结构

植被带的迁移方式不大可能是空间上简单的平移，基本的变化在物种层次上。由于不同物种有其特定的生态位，当环境比例如温度发生持续变化时，各物种将根据其特征生态位在生长发育和繁殖上进行调节和适应。其结果是生态系统内各种群在其大小和作用上发生重组，而重组有可能使生物多样性降低或可能导致新种的产生。就整个生物圈而言，由于环境变化所导致的物种的重组、丧失和增加取决于环境变化的强度、时空分布、各物种的脆弱性和适应性。其中环境变化的速率可能起着至关重要的作用，如果环境变化的速度超过物种适应和变异的速度，则很可能导致物种的丧失和多样性的下降。而结构组分的变化在一定条件下，将可能逐渐改变植物群落的组成、加快群落的演替，最终可能导致植被类型的改变。

（二）植被的功能

由于二氧化碳浓度、温度和降水的变化，全球各生态系统的生物生产能力将会受到影响。一般地讲，二氧化碳浓度升高，气温变暖，降水增加均会有利于植物生长，第一性生产力将提高。但由于温度和降水变化的不均衡性，生物生产力的变化也是不等的，有的地方生产力可能提高，有的则有可能减少。但就全球而言，目前研究的结果是总的

生物量可能增加。

生物地球化学研究是了解植被功能变化的重要途径，因为生态系统中化学元素循环的变化，直接影响着生态系统功能特征。宏观上，植被的功能表现在对人类社会提供食物、纤维、药材和其他产品、涵养水源、调节气候以及为病虫害防治提供生态背景等， 而所有这些功能均可能由于气候、人类活动和其他环境变化而受到影响。

（三）植被分布格局

全球环境的变化，可明显地反映在植被分布格局的改变上，即植被带的迁移。研究表明，CO_2 浓度加倍，地球表面温度将升高，北半球及其以北地区的温度和土壤温度区域界线将大幅度北移。如果平均温度升高 2℃，永冻带(permafrost zone)的南界将北移 205~300km。如果温度升高 3℃，加拿大永冻土面积将减少 25%。这样必然导致地球植被区域发生变化，这种变化主要表现为森林面积减少，森林类型发生变化，草原面积增加，全球植被总的生物生产力下降。一组森林生长模型预测结果表明，北美洲的南部和中部地区因气候变化森林将大面积死亡，主要原因是温度升高，水分可利用性降低。

Emanuel 等(1985)用 Holdridge 生命带分类原理预测了全球温度和降雨量的变化及其对植被带的影响。结果表明在低纬度地区生命带变化较小，但中纬度和高纬度地区变化明显。北方森林(boreal forest)和冻原(tundra)的面积将分别减少 37%和 32%。北方森林的北界将北移 40%以上，侵占冻原地带。北方森林的南部将大面积地被温性森林(temperate forest)所取代，而温性森林则有不少被草原(steppe)所替代。整个地球植被将发生较大的地带性变化。这种变化要滞后于气候的变化，可能有数十年的滞后期。全球主要植被类型面积的变化预测见表 16-3。

表 16-3 全球主要植被类型面积变化预测

植被类型	现有面积 $/10^3km^2$	GCM 预测的变化			
		OSU	GFDL	GISS	UKMO
冻原	939	–302	–515	–314	–573
荒漠	3699	–619	–630	–962	–980
草地	1923	380	969	694	810
干旱林地	1816	4	608	487	1296
湿润森林	5172	516	–402	120	–519

引自 Watson et al. 1996

气候变化引起植被地带性变化这一点，科学家们基本认识是一致的。但具体到某一区域，植被怎么变化？演替过程、顶极群落类型有什么不同？植被变化的过程和速度如何？群落如何适应气候变化等问题是难以定论的。

四、全球变化对荒漠化进程的影响

全球变化与荒漠化(desertification)是当前世界上重大的环境问题，困扰着全人类的

生存与发展。按荒漠化防治国际公约对荒漠化的定义，“荒漠化”是指包括气候变化和人类活动在内的各种因素所造成的干旱、半干旱和干燥半湿润地区的土地退化，而“土地退化”是指由于一种过程或数种过程结合使旱作农地、灌溉农地、牧场和林地生物生产力下降或丧失。土地荒漠化极大地改变了陆地表面的物理特征，破坏了地表辐射收支平衡，诱发气候和环境变化，而气候和环境变化的反馈作用又将进一步影响土地荒漠化的进程，如此循环往复，从而对地球环境产生深远影响。

据联合国最近公布的资料，目前已经荒漠化或正在经历荒漠化过程的地区遍及世界六大洲 100 多个国家，世界上 1/5 的人口受到荒漠化的威胁，全球干旱地区(包括半干旱和半湿润干旱区)总面积已达 6 亿 hm^2，占世界陆地总面积的 41%。全球约有 36 亿 hm^2 的耕地和牧场正受到全球荒漠化的影响，1984~1991 年，土地荒漠化以每年 3.4%的速率增加。荒漠化对人类生存环境、社会和经济带来的严重后果已被联合国所重视，并宣布荒漠化已成为世界上最严重的环境问题。

我国科学家赵宗慈利用 5 个应用较广的全球大气与海洋环流模式(GFDL、GISS、NCAR、OSU 与 UKMO)模拟表明：由于大气中二氧化碳浓度增加，将导致全球地面气温增暖大约 4℃，其中引人注目的是中纬度地区土壤湿度可能减小，而荒漠化土地面积将扩大。Emanuel 等人预测，当大气中二氧化碳含量增大时，将导致气候变化，由此荒漠化面积会增加 17%。

慈龙骏指出，我国荒漠化土地主要发生在干旱半干旱牧区、农牧交错区、沙漠边缘及现代化工矿开发区和人口集中的乡镇附近农区。土地荒漠化是土地在这种条件下长期逐渐退化的，荒漠化的扩大和逆转是受气候的干湿变化制约的。干旱气候的多变和过度的人类活动对荒漠化产生主要的影响。

在全球变化的影响下，我国干旱区范围的扩大及荒漠化发展将加深。慈龙骏研究表明(表 16-4)：

表 16-4　目前及全球气候变化条件下我国干旱区范围(单位:10^4km^2)

		极端干旱区	干旱区	半干旱区	半湿润区	湿润区	总干旱区面积	荒漠化土地
1950~1981	面积	69.7	137.0	108.0	52.6	592.7	297.6	278.0
	%	7.3	14.3	11.2	5.5	61.7	31.0	29.0
温度 +1.5℃	面积	76.6	142.7	108.9	64.8	567.0	316.4	298.0
	%	8.0	14.9	11.3	6.8	59.0	33.0	31.0
	变化	-6.9	+5.7	+0.9	+12.2	-25.7	+18.8	+20
温度 +4℃	面积	81.3	156.4	116.2	109.3	496.8	381.9	348.6
	%	8.5	16.3	12.1	11.4	51.7	39.8	31.3
	变化	+11.6	+19.4	+8.2	+56.7	-95.9	+84.3	+70.6
温度 +4℃ 降雨量 +10%	面积	78.6	146.9	108.4	78.1	548.0	333.4	312.0
	%	8.2	15.3	11.3	8.1	57.1	34.7	32.5
	变化	+8.9	+9.9	+0.4	+25.5	-44.7	+35.8	+34.0

① 现有的干旱、半干旱和半湿润区的总面积约 $297.6\times10^4km^2$，加上极端干旱区的面积 $69.7\times10^4km^2$，总面积达 367.3×10^4 km^2，占国土总面积的 38.3%，荒漠化土地总面积约 $278.0\times10^4km^2$。

② 处于中纬度的我国荒漠地带受全球变化的影响最大。温度上升 1.5℃，我国半湿润至干旱程度的土地面积增加约 $18.8\times10^4km^2$，湿润区面积减少约 $15.7\times10^4km^2$，荒漠化面积增加约 $20.0\times10^4km^2$；温度上升 4℃，半湿润至干旱程度的土地面积增加约 $84.3\times10^4km^2$，湿润区面积减少约 $95.9\times10^4km^2$，荒漠化面积扩大约 $70.6\times10^4km^2$，荒漠化面积平均每年增加约 $8.3\times10^4km^2$(按 1965~2050 年 85 年平均计算)。

第三节　中国的全球变化研究

一、地理环境特征

中国是全球自然地理环境最丰富多彩的国家之一，疆域辽阔，覆盖中纬度，处于欧亚大陆东岸，地貌多样，自然演变过程复杂，具有独特的生态环境格局。全球变化对中国有影响，同时中国地区的自然、社会和经济活动对整个地球系统也产生着重要的影响。中国的地理环境特征：

(一) 具有独特的景观

青藏高原是世界上最高的高原，平均海拔高度在 4000m 以上，素有世界屋脊之称， 它主要从热力学和动力学两个方面影响着中国、东亚乃至全球的气候系统。冬季时，高原东侧平原上空形成北风，从而加强了由于海陆分布引起的东北季风。夏季时，高原加强了其东侧上空的西南季风，并增加了东部地区的降水。高原季风的存在，对西北干旱气候的继续加深也有重要的影响。另一方面，青藏高原的动力影响主要表现在对气流的屏障和分流作用上，其分流作用实际上使西风带向南扩展了 5~10 个纬度；其屏障作用使得蒙古高原一带在冬季受暖平流影响较少，夏季则有利于印度低压的维持。

黄土高原位于我国东部季风区的中纬度地带，东西跨约 11 个经度，南北跨约 6 个纬度，处于沿海向内陆、平原向高原、湿润向干旱、森林向荒漠过渡的十字路口。黄土高原发育巨厚的黄土层，比较全面地记录着第四纪以来古环境演变的历史，具有良好的古环境研究条件。黄土高原地理环境处于脆弱状态，水土流失严重，面积达 63 万 km^2。这是有关全球变化中人文和自然因素中难得的素材。

广阔的东部沿海地区及海域是世界上最完好的海岸带，这条海岸带上有黄河、长江和珠江三角洲等河口区，都是具有较高生产力的生态系统，也是研究海陆相互作用的理想地区。

(二) 典型的季风气候

中国位于世界气候的脆弱带，东半部受亚洲季风气候控制，季节分明。强季风气候使中国成为世界上气候变异大的区域之一，而且较大的气候异常在我国都有所反映。季风系统对全球变化反应敏感，因而，季风气候区便成为观察全球变化的一个重要窗

口，同时季风驱动的生态系统和其特有的自然地理系统也成为全球变化的一个重要组成部分。

（三）生态环境的敏感脆弱性

从全球变化的角度看，地球上必然存在一些对全球变化最为敏感的地区，我们谓之敏感区。植被是气候、水体、土壤等多种环境要素综合作用的结果，因此可以把它看做是对某种环境状态的度量。一种植被型必然代表某种特定的环境要素组合和环境状态，不同植被类型之间的过渡带或生态群落区则反映了两种环境状态的临界点。当外界条件发生变化时，必然影响到临界点的变化，表现为过渡带或生态群落区的迁移。因此，不同类型植被间的过渡带或生态群落区是全球变化的敏感区。

组成我国生存环境的气候、地表水体和土壤等要素的天然组合造就了我国植被的宏观分布格局，形成了不同时空尺度和不同性质的植被过渡带或生态群落区，较其他地区而言，它们对全球变化更为敏感、影响更为强烈。

我国的生存环境极其脆弱，对外界扰动的承受力很差，主要表现在自然灾害多、发生的频率高、损失大。在我国发生的自然灾害就有干旱、洪涝、台风、海啸、风暴潮、低温冻害、林火、地震、滑坡、泥石流、水土流失、风沙灾害、病虫鼠害等等。

二、中国全球变化研究进展

中国正式启动全球变化研究始于 1985 年。截止 1994 年 6 月已确立的有关全球变化方面的研究项目 240 项，到 1993 年底，已完成 132 项，占项目总数的 55%，计划投入经费 12 518.3 万元，按每个科学家参加一个项目计算，全国参加全球变化研究的科学家达 5706 人次(张新时　1997)。如此人力、物力及财力的投入，大大促进了中国全球变化的研究，取得了丰硕的成果。

以下将从三个层次来阐明国内近几年的发展概况。

（一）微观层次上的生理生态学研究

全球变化对植物的影响关键在于两个方面：① 二氧化碳浓度倍增对植物的直接作用；② 温度增加对植物的间接作用。在第三节全球变化对农业的影响中已有具体介绍，其结论概括如下。

生长在高二氧化碳环境下的植物，其生理生态、形态及化学成分等方面将会发生相应的变化，表现在光合作用的速率出现不同程度的提高；呼吸作用受抑制气孔密度减少、水分利用效率增加；生物量及产量增加；一些关键蛋白质及酶、非结构性碳水化合物含量增加；组织中的氮、硫等元素含量降低；根系及花的发育也随二氧化碳浓度的升高而提前等。不同光合途径(C_3、C_4 及 CAM)及不同植被类型(自然植被、栽培植被)的植物随二氧化碳浓度发生的上述指标的变化在长期反应与短期反应方面具有很大的差异。

(二) 中尺度生态系统的结构与功能

为将植被的结构与功能动态地反映于气候-植被分类之中，我国也开展了生态系统的动态模拟研究。项斌(1996)等依据在二氧化碳浓度倍增条件下测得紫花苜蓿的光合作用、蒸腾作用、气孔导度及水分利用效率等生理生态参数，以广泛应用的 Farquhar 和 Caemmerer 的光合作用模型为基础，结合气孔导度的一个经验模型和蒸腾作用方程，建立一个简单的叶片生理生态模型。肖向明(1996)等应用国际著名的草地生态系统模型——Century 生态系统模型对内蒙古锡林河流域羊草草原和大针茅草原 1980~1989 年的生量动态进行了模拟，并对气候变化和大气二氧化碳浓度倍增对于典型草原初级生产力和土壤有机质含量的影响进行了预测。延晓冬等人(1995，1996)通过对长白山森林生态系统的研究，针对林窗模型难以在区域尺度应用的不足，强调考虑树种的生活史，基于 Zelig 模型建立了长白山森林生态系统的林窗模型——NEWCOP (Northeastern Woods Competition Occupation Processor)。该模型涉及东北地区重要的森林树种共 34 种，在整个东北林区，即大兴安岭、小兴安岭和长白山地区都得到极好的验证。该模型不仅可模拟目前气候条件下东北地区森林的水平分布和垂直分布，而且也可再现森林的更新、演替和生产力。肖向明等人(1996)将 Century 模型应用到内蒙古典型草原生态系统，在利用实测资料检验该模型的基础上，模拟了羊草草原和大针茅草原的生物量动态和土壤有机质含量，以及其对于未来气候变化的反应。高琼等(1994，1996)对景观尺度生态系统的动态进行了研究，建立了东北松嫩平原碱化草地景观动态模型，并模拟了其对气候变化的响应。该模型描述了碱化草地的植被动态和土壤碱化相互耦合的过程，考虑了局部土壤的碱化过程，局部植物群落根据其优势植物种对土壤碱化度的不同容允度的演替过程，优势植物种的水平扩散过程和土壤碱化度的水平趋均过程，具有将模型的空间耦合成分与局部机制成分分离开来分别加以处理，以及模型的局部机制可从相应的匀质斑块尺度模型中直接得到的特点，从而可以很容易地在前人的匀质斑块模型的基础上构造空间仿真模型。

(三) 宏观范畴的气候-植被格局与演变

张新时等人(1989，1993，1995)首次将 Penman 方法、Thornthwaite 模型、KIRA 模型和 Holdridge 生命地带系统等国际通用的气候-植被分类模型引进中国，对中国植被分类进行了模拟研究，并根据中国植被的实际分布情况对 Holdridge 生命地带系统的暖温带与亚热带的界线和雪线界线进行了修正，建立了修正的 Holdridge 生命地带系统。尽管如此，由于中国气候和植被分布的特殊性，中国的气候-植被分类还不能为 Holdridge 生命地带系统所反映，而且该系统还存在利用局地潜在蒸散进行区域尺度的气候-植被分类的缺陷，为此，周广胜与张新时(1996)提出了基于区域潜在蒸散进行气候-植被分类的观点，并给出了热量和水分划分的指标：区域热量指数(RTI)和区域湿润指数(RMI)，初步定量地研究了中国的气候-植被分类，同时利用预测未来气候方案预测了中国植被的演变趋势。但是，这些用于中国气候-植被分类研究的模型还没有将植被的功能，特

别是植被的净第一性生产力考虑进模型。张新时等人(1995)首次将 Holdridge 生命地带系统与自然植被净第一性生产力模型——Chikugo 模型(1996)结合起来研究全球变化对于中国植被的分布与生产力的可能影响。由于 Chikugo 模型是基于潜在蒸散而非实际蒸散计算自然植被的净第一性生产力，因而不能正确地反映干旱和半干旱地区的植被净第一性生产力。周广胜和张新时(1995)根据植物的生理生态学特点及所建立的联系能量平衡方程和水量平衡方程的区域蒸散模式， 建立了联系植物生理生态学特点和水热平衡关系的自然植被净第一性生产力模型。据比较，该模型克服了 Chikugo 模型应用潜在蒸散计算自然植被净第一性生产力的不足，优于 Chikugo 模型，特别是在干旱半干旱地区。

总体而言，我国关于气候-植被分类的研究还停留在利用国外模型或简单的统计分析水平上，还没有建立起一套适于中国气候-植被分类的指标体系，也还没有将对植物生理活动有明显限制作用的气候因子引入气候-植被分类的模拟研究之中。

全球变化已经发生，并将继续到可预见的将来。全球变化将对陆地生态系统产生严重影响，从而影响到国家的政治和经济、区域政策的制定。为了减少预测全球变化及其对于生态系统影响的不确定性，最大限度地减小全球变化的不利影响，利用全球变化的有利方面，保证地球生命支持系统朝着有利于人类生存与持续发展的方向发展，必须研究陆地生态系统对于全球变化的反应机理，而气候-植被关系则是全球变化与陆地生态系统关系研究的关键。

综上所述，尽管国外已就气候-植被分类的指标和模拟开展了一些研究，但仍处于初期阶段，都还仅用于全球尺度的粗略模拟，更不能适用于中国特定的区域研究。特别是由于中国所具有的季风气候及号称世界“第三极”的青藏高原，使得中国气候-植被分类的特殊性常不能为国际上通用的模型所反映。为此，应以中国陆地生态系统为研究对象，针对中国自然植被分布的特点，结合当前国际上流行的气候-植被分类指标体系和相关模型，研究中国气候-植被的关系，并考虑到与大气环流模式的耦合及其可能提供的用于判别植被类型的参数，建立适用于大气环流模式的中国植被分类系统和对植物生理活动具有明显限制作用的中国气候-植被分类的气候指标体系及气候-植被分类模式，为大气环流模式对于中国区域的气候模拟提供动态的陆地植被类型，提高大气环流模式对于中国区域气候的预测能力，减小未来气候预测以及未来气候变化对中国陆地生态系统影响评估的不确定性。为达到此目标，未来中国的气候-植被关系研究拟注重现有的全球变化研究，各学科计划间的交叉，并加强以下方面的研究：

1) 气候-植被分类的原则与方法体系的建立，同时考虑到与大气环流模式的耦合及大气环流模式可能提供的用于判别植被类型的参数；

2) 对植物生理活动具明显限制作用的植被地理分布气候因子的选取与指标体系建立；

3) 综合植被的结构和功能两个方面的气候-植被分类模型的建立；

4) 气候-植被分类模型与大气环流模式的耦合与参数转换。

而近期工作的重点应是根据中国的特点，即季风气候及号称世界“第三极”的青藏高原，建立中国自然植被的气候-植被分类的原则与方法体系，选取反映植物生理活动的气候-植被分类的因子并建立指标体系，为发展综合反映植被结构与功能的气候-植被

分类模型及与大气环流模型的耦合奠定基础。

今后需要进一步加强的研究领域，有 3 个方面特别值得重视：首先是在微观层次上的生态生理学研究。生态生理学研究是评价生态影响和生态毒理学的基础，也是从机制上了解环境对生物影响的基本途径。迄今这类研究扩展到包括植物、动物、微生物及多种环境要素。可以预期，新兴的生态毒理学研究将可能发挥重要作用。第二，生态系统动态的研究。这包括对生态系统动态的观察和实验以及基于计算机模型的系统研究。长期的生态系统定位研究具有特别重要的价值。值得重视的是生态系统建模在概念、技术上的改进，特别是生态建模与实验的结合。第三，大范围生态与环境监测。为了解生态系统和生物圈的动态，仅凭地面定位站(网)的观测是不够的，还必须充分发展基于航空和卫星的遥感技术。

第十七章　经济生态学

第一节　导　　论

随着科学技术的进步，人类在加快自然资源开发，促进社会经济发展的同时，面临日益严重的生态危机，生存与发展受到前所未有的挑战。在此情况下，人类开始重新审视自己在生态系统中的位置。一些学者开始对人与自然、社会经济发展与环境保护等关系进行研究，以求得社会经济的可持续发展。在研究过程中，生态学与经济学密切结合、相互渗透，逐渐形成了一门融生态学和经济学为一体的新兴边缘学科——经济生态学。

经济生态学(economic ecology)是研究生态学和各类生态系统、种群、群落、景观、生物圈过程与经济过程相互作用方式、调节机制及其经济价值的体现的科学；它谋求实现社会经济与自然生态的协调、持续和稳定发展。经济生态学起步较晚，始于20 世纪 70 年代，而且由低层次向高层次逐步发展，即由种群、群落向景观、生物圈的层次发展。随着人类认识的发展，经济生态学由微观向宏观，直至向着人类共同解决全球性问题的广度发展，具有重要的战略意义。

一、经济生态学的兴起

20 世纪 20 年代初，美国社会生态学家 MacKenzie 首次提出了经济生态学的概念，并在生态学与经济学的结合方面作了初步的探讨和尝试。但真正结合社会经济问题开展生态学研究的，应首推美国海洋生物学家 Carson。她于 1962 年发表了名著《寂静的春天》，书中详细揭示了近代工业对自然生态的影响和经济生产与自然生态的关系。20 世纪 70 年代以来，随着生态危机的加剧以及系统科学向生态学、经济学等领域的渗透，一大批论述经济生态问题的著作相继问世，从此开始了生态学与经济学互相渗透与融合的新时代，一门崭新的综合科学——经济生态学应运而生。

值得一提的是，生态学与经济学本来就有着天然的联系。生态学一词源于希腊文oikos，其意为“住所”或“栖息地”。而经济学一词也是从希腊文派生出来的，原意是“家庭的管理”。从词源看，二者有着密切的同源关系。随着科学的发展，生态学与经济学越来越紧密地联系在一起，并最终有机结合而形成经济生态学这门新兴的边缘学科。

二、经济生态学的概念和研究对象

（一）经济生态学的概念

经济生态学是研究经济生态系统中能流、物流、价值流和信息流之间的相互转化及其作用规律的科学。即经济生态学是研究生态学和各类生态系统、种群、群落、景观、生物圈过程与经济过程相互作用方式、调节机制及其经济价值的科学。简言之，经济生态学是用经济观点和方法研究生态学问题，分析和评价各类生态系统的结构与功能的经济价值。

（二）经济生态学的研究对象

经济生态学是一门由生态学和经济学相互渗透、有机结合形成的新兴综合性科学，它所观察和研究的客观实体是由生态系统和经济系统组成的有机统一体。经济生态学作为一门独立学科，它既不同于生态学，也不同于经济学，它的研究对象只能是经济生态系统这样一个经济-社会-自然复合系统，研究该系统中生态系统与经济系统的相互关系及其发展规律，以谋求实现社会经济与自然经济生态的协调、持续、稳定发展。值得注意的是，这里所研究的经济生态系统不是把经济系统和生态系统的简单相加，而是从经济学的角度，研究生态学问题。换言之，是研究生态系统与经济系统的内在联系，即内在规律性。生态系统与经济系统间的联系虽然多种多样，但最根本的联系是两者之间存在着物质、能量、价值和信息的转化，生态系统与经济系统之间的联系还有一个中间环节，就是由各种技术手段组成的技术系统。因此，概括地讲，经济生态学的研究对象是由生态系统、技术系统和经济系统所构成的综合系统。

三、经济生态学的特征

（一）综　合　性

经济生态学是一门多结构、多层次、多系统的综合性学科。它的综合性首先表现在基础学科的综合性。经济生态学是研究生态系统和经济系统协调发展规律的科学，它要依赖自然科学、社会科学等诸学科的综合运用。在自然科学方面，它要利用生态学、生物学、数学等方面的研究成果与手段；在社会科学方面，它要利用经济学、管理学等方面的知识。其次，经济生态学的综合性根源于经济生态系统由多种生态要素和多种经济要素综合组成的特点，这些要素的结合是在经济与生态协调基础上的结合。因此，经济生态学具有高度综合性。

（二）整　体　性

经济生态学整体性特征根源于它的研究对象经济生态系统的整体特征。经济生态系统是一个经济与生态结合的有机整体，其内部组成的子系统之间，以及各种组成的生态和经济要素之间，都具有密切联系的不可分割性，它们之间的结合统一都是来源于经济与生态的相互结合与协调统一。经济生态学反对用孤立的、片面的观点看待自然生态和社会经济发展问题，要求从整体上看待经济生态问题，即从生态系统与经济系统和技术系统，生态效益与经济效益和社会效益的相互关系上，以及从近期与长远利益上去研究经济生态系统的发展运行规律。

（三）实　用　性

经济生态学是一门理论性与应用性很强的学科。概括地讲，经济生态学可解决两类问题。一是社会经济问题。在过去的社会经济发展中，由于没有遵循生态规律，因而酿成了苦果。比如农业生产中，过去只注重总产值的提高，而忽视农业产业结构的合理性，于是乱垦滥伐、超载过牧、过度捕捞等违反生态规律的现象时有发生，造成农业生态系统的恶性循环。二是疑难问题。以往在生态学和经济学各自独立研究时，欲解决而无法单独解决的疑难问题。比如在农作物病虫害防治上，长期以来只注重化学防治而忽视生物防治，对病虫害的天敌研究甚少，过量使用农药使病虫害的抗药性越来越强，不仅造成农产品成本上升、品质下降，而且使污染物沿食物链迁移、富集，造成健康隐患。

（四）战　略　性

经济生态问题，比如人口、资源、环境、经济的相互关系问题，由于其影响在时间上的长久性和空间上的广阔性以及造成危害的严重性等方面直接关系人类社会的生存和发展，因而成为带有全局性、长远性、根本性的战略问题，越来越多地引起世人的关注。经济生态学作为一门研究经济生态系统，指导人们正确处理经济生态问题的科学，必然具有战略性的特征，即要从长远的角度和全局的角度客观地考虑生态系统和经济系统、生态平衡和经济平衡、生态效益与经济效益和社会效益的相互关系等问题，指导人们合理地调节和控制经济生态系统，协调经济生态平衡，正确处理近期利益与长远利益、局部利益与整体利益的关系，力求生态效益的持续稳定提高。

（五）协　调　性

经济生态学的协调性特征，直接根源于其研究对象经济生态系统的经济与生态协调的基本特征。

四、经济生态学的研究内容、体系和方法

（一）经济生态学的研究内容

经济生态学的研究内容，主要包括两部分，即基础理论研究和应用研究。

1) 基础理论研究。用经济学的观点和方法研究生态学问题，包括生态系统、经济系统和技术系统三者之间的关系及其在人类再生产过程中的地位和作用；生态规律与经济规律、生态效益与经济效益和社会效益的相互关系及其在社会经济发展中的地位和作用；生态系统的能流、物流、信息流与经济系统的能流、物流、价值流和信息流的关系；社会经济制度与生态系统稳定性的关系；技术措施与生态系统的关系；分析和评价各类生态系统的结构和功能的经济价值；建立经济生态学模型的理论与方法；经济生态学的特征、性质及学科体系；防治环境污染和生态退化、恢复生态系统稳定性的投资效益和技术措施；经济生态系统的规划、管理与持续发展研究等。

2) 应用研究。主要包括建立高效益、低消耗、无污染的良性循环系统；运用物种间相生相克原理，建立多种群共生的生态农业结构；加强引种、病虫害管理；建立经济-社会-自然复合生态系统；对生态系统的结构、功能和目标进行综合评价；制定科学的经济生态系统管理目标和规划；搞好生态产业与生态工程建设，建立对土壤、水域、大气质量的检查制度；建立既有利于经济发展又有利于生态平衡的决策机构，制定符合经济生态原理的政策和法规等。

（二）经济生态学的体系

经济生态学的学科体系，大体可分为四类。

1) 理论经济生态。从总体上研究人类社会经济活动和自然生态环境的统一运动，揭示经济生态发展的总体规律。通过研究经济生态理论和实践的共性、全局性问题，为各门应用经济生态学提供理论基础。比如经济生态学、经济生态学史等。

2) 部门经济生态。研究国民经济某一部门的经济生态发展状况，揭示经济生态系统中某一子系统的具体规律。比如农业经济生态学、工业经济生态学等。

3) 专业经济生态。研究国民经济某一行业的经济生态状况。比如能源经济生态学、人口经济生态学等。

4) 区域经济生态。研究某一自然地理区域的利用、改造和保护。比如城市经济生态学、农村经济生态学等。

（三）经济生态学的研究方法

经济生态学的研究方法是由其学科性质及研究对象的特征所决定的。经济生态学是自然科学和社会科学相互交织构成的边缘科学，其研究对象是生态系统和经济系统复合而成的有机整体。因此，经济生态学的研究方法必然具有与边缘学科整体性和综合性相

适应的特点。既有自然科学和社会科学一般所采用的研究方法，也有经济生态学所特有的研究方法；既要进行定性分析，也要进行定量分析。通常，经济生态学采用的定量分析方法有排序法、聚类分析法、3S(GIS、RS、GPS)方法、系统分析法、控制论方法、经济生态模型与模拟等；定性分析方法有野外考察法、定位观测法、综合分析法、比较法、 实证方法、专家咨询法等。

五、经济生态学的研究目的和意义

(一) 经济生态学的研究目的

经济生态学的研究目的，就是应用基本的经济规律和生态规律，研究揭示经济生态系统的物质循环、能量转化和信息传递的规律，试图建立良性的经济生态系统，促进人口、资源、环境、经济的可持续发展。为了达到此目标，人类应学会正确处理人与自然的关系。人类是地球生物圈的一员，人类必须善待自然，与大自然和睦相处，永久共存。如果无视自然规律，与自然为敌，必将遭到自然界的无情报复。生态危机的出现，就是人与自然关系恶化的真实写照。因此，人类在发挥主观能动性的同时，要正确估计自己对自然的利用能力。把人类的技术行为、经济行为和生态环境看成一个相互制约的系统，按照自然规律合理开发利用自然资源，与自然和谐相处、协调发展。

(二) 经济生态学的研究意义

经济生态学的产生，为社会经济发展和生态环境保护提供了理论基础和科学依据。 它对揭示经济生态系统的发展规律，制定社会经济可持续发展战略，加强经济生态系统的调控、管理与规划，协调人口、资源、环境的关系，解决生态问题、恢复受损生态系统、保护环境，提高生态效益、经济效益和社会效益，促进经济生态系统的可持续发展具有十分重要的意义。

六、经济生态学的发展趋势

经济生态学由于所研究的内容适应了当代社会经济发展的需求，所以从它诞生的那一刻起，就受到普遍关注，这使得经济生态学的地位越来越高，作用越来越大。经济生态学的研究不仅与社会经济的关系日益密切，而且还逐渐渗入到政治领域。因为生态破坏、环境恶化、经济衰退与政治有着千丝万缕的联系，很难将它们割裂开来。近年来， 全球保护生态环境的呼声越来越高，并得到社会各界人士的广泛支持与积极响应，形成了一股世界性的、带有政治色彩的生态潮流。生态学已经不再是一个冷僻的专业术语，而成为现实生活中的流行词汇。生态问题已日益受到各国政府的重视，并采取了一些积极的措施，联合国也成立了相应的组织。毋庸置疑，生存与发展是人类社会永恒的主题，而实现这一目标则有赖于经济生态学的发展。科学技术和社会经济的发展，必将促进经济生态学的成熟与完善。以下几方面可能是经济生态学的发展趋势与重点。

(一) 建立科学的经济生态学理论体系

经过生态学家、经济学家、社会学家等的共同努力，在经济生态学产生后的短短几十年中，经济生态学已经初步具有了自己的理论基础和思想体系，但尚未成熟与完善，很多理论问题有待进一步的研究与探索，一些空白需要填补。今后数年经过努力，一定能够建立起完善的、科学的经济生态学理论体系，为经济生态学的应用奠定良好的基础和开拓广阔的研究领域。

(二) 经济生态学逐步向定量化发展

在社会经济发展中，不仅需要经济生态学提供先进的理论指导，还需要经济生态学能够提供一套科学的定量方法。目前，虽然在这方面作了不少研究工作，并取得了一些成果，但尚未取得实质性进展，无论在使用范围或质量上都与实际要求相差甚远。因此，尽快建立一整套经济生态学的计量方法与模型，既是经济生态学理论发展的需要，更是实际应用的要求，同时也为计算机在经济生态学中的应用奠定基础。经济生态学的定量化与建立一套科学的经济生态学指标体系是分不开的。目前，还没有完备的指标体系。仅有一些探索性的虚拟指标体系，有待进一步的验证。所以，建立科学的经济生态学指标体系是一项非常紧迫和有重要意义的工作。

(三) 经济生态系统结构与功能的研究将有所突破

经济生态学的产生与发展是与系统科学密不可分的。系统科学的进一步发展和向经济生态学的进一步渗透，使得经济生态系统结构与功能以及动力机制方面的研究有所成就。生态学自身的发展也会对这方面的工作有所贡献。

(四) 经济生态学将进一步向应用性、综合性方向迈进

经济生态学的研究将进一步与社会经济重大问题密切地结合，与其他学科的交叉与渗透将更加广泛。因此，经济生态学的内涵将更丰富，应用性、综合性将更强。

(五) 经济生态学将形成自己的分支学科

随着经济生态学的逐步完善和在实践中的广泛应用，每一产业、行业、区域都有自己的生态经济问题作为研究重点，在任何一方面的发展和突破，将会逐渐形成有自己特色的经济生态学分支科学。目前，这一趋势的迹象已经相当明显。比如人口经济生态学、生态伦理学、产业生态学等新学科的形成与发展。

第二节　经济生态系统

一、经济生态系统的概念和特征

(一) 经济生态系统的概念

经济生态系统是由生态系统和经济系统通过技术中介所构成的物质循环、能量转化、信息传递和价值增值的结构单元。它是具有独立特征、结构和功能的经济生态复合系统(图 17-1)。

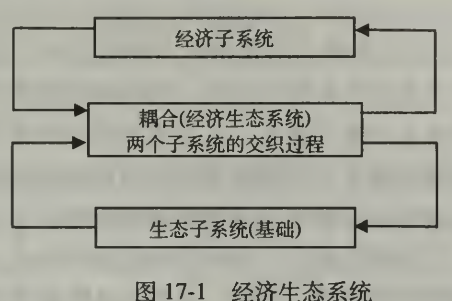


图 17-1　经济生态系统

(二) 经济生态系统的特征

1) 复合性。经济生态系统是由生态系统和经济系统复合形成的复合系统，它既不是单纯的自然系统，也不是单纯的人工系统，它的运行同时要受到经济规律和自然规律，尤其是生态规律的制约。

2) 结合性。在经济生态系统这一复合系统的运行中，生态系统和经济系统的地位和作用是不同的。其中生态系统是主导，是目的；经济系统是基础，是保证；经济生态系统的建立，体现了生态和经济两个系统的结合，同时也体现了自然规律与经济规律作用的结合。

3) 统一性。在经济生态系统内部，生态和经济两个子系统的运行方向和要求是对立统一的。一方面，经济系统追求对生态系统的“最大的利用”，而生态系统对自身的要求是“最大的保护”，因此，二者在社会经济发展过程中是会产生矛盾的。但另一方面，从长远看，人类对生态系统，不仅要求目前的利用，更要求长远的持续利用，因此也需要对其进行保护。这就使生态和经济两个方面的要求达到统一，从而也就使得二者的矛盾统一能够实现。

4) 有序性。经济生态系统的有序性，实质上就是生态系统的有序性和经济系统的有序性的融合。经济生态系统的有序性是可以调节的。经济生态系统是一个具有耗散结构的开放系统，当外界环境向系统内部输入能量和物质时，就会在系统内部形成负熵流，以抵消系统本身因熵值增高而呈现的无序状态，从而维持系统的有序状态。生态系统和经济系统之间存在着物质、能量、信息的传递和交换，也就是相互输入、输出熵流，因而使得二者融合的经济生态系统保持有序性。但经济生态系统的有序性是相对的，而不是绝对的，它处于动态变化之中。当系统总熵值增加时，无序性增大，系统表

现为退化或崩溃；反之，当系统总熵值下降时，有序性增大，系统表现为上升或进化。在一定条件下，经济生态系统的这种运动变化是可以通过反馈作用机制进行自我调节控制的。当经济生态系统处于相对有序的稳定状态时，其结构、功能和生产力都保持相对稳定，若系统的某一环节出现偏差时，就可能造成系统的结构破坏、功能失调，经济生态系统就可以通过反馈调节，使系统恢复稳定，结构得以修复，功能得以调整。

5) 中介性。经济生态系统是有由生态系统和经济系统相互交织、耦合而成的复合系统。这两个子系统的连接和耦合，是通过技术系统这个中间环节来实现的。技术系统既是连接生态系统和经济系统的纽带和桥梁，也是经济生态系统持续稳定发展的重要保障。

6) 非平衡稳态。经济生态系统无论其系统与环境之间、系统与各子系统之间、子系统内部各成分之间，还是成分内各因子之间，时时刻刻都在进行着能量、物质及劳动量的输入与输出。这种无休止的输入输出，正是系统内还没有达到平衡的表现，越不平衡就越需要能量和物质的输入输出，这种输入输出的目的是使系统趋于平衡，输入输出过程是系统运动的过程，这种运动的过程使系统保持稳定状态。这种能量、物质、价值和信息的输入输出关系，把系统各成分、各因子紧紧地联系在一起。每个子系统总体功能中亦有其他因素所不能替代的作用。因此，必须从系统整体的功能与作用中去分析某个因子的功能与作用，而不能离开整体的功能去孤立地分析，以实现经济生态系统的良性循环。

7) 耐受性。耐受性是一切开放系统所具有的基本特征之一。经济生态系统内各个层次上的大小因子，既具有差异性，即各自具有不同的功能和作用；又具有同一性，即不同的功能作用都是为了维持系统总体稳态、调节系统的进展演替。但这种调节具有一定的限度，即构成系统整体的各因子在一定限度内调节着整体的动态平衡。这种耐受性限度有三种可能的结果：当人类所采取的各种调节手段与生态系统耐受性基本相符合时，总体耐受性限度提高，功能增强，并且大于各个成分单独功能之和；当社会调节手段与生态系统耐受性有部分不适应时，总体功能可能在各部分功能之和上摆动；当社会调节手段主要部分与生态系统耐受性不适应时，总体功能小于各部分功能之和。

二、经济生态系统的结构

(一) 经济生态系统结构的概念及其结构成分

经济生态系统的结构是指系统内部各组分之间在空间或时间方面的有机联系或相互作用方式，即经济生态要素在时间、空间排列的有序组合。

经济生态系统的整体结构即一级结构，是由生态系统、经济系统和技术系统三个子系统，即二级系统相互耦合而成的复合结构。二级结构成分为一级结构的子系统成分，即包括生态系统、经济系统和技术系统三个子系统。三级结构成分为二级结构成分的子系统成分，即包括生物系统、环境系统等组成，四级结构成分为三级结构成分的子系统成分，即包括动物、植物、微生物、能源、矿产等等。依次类推，可继续细分下去。可

见，经济生态系统结构是一个多成分、多层次的金字塔式的网络结构。比如植物可细分为木本、草本等；能源可分为太阳能、风能、矿物燃料能、核能等。由经济生态系统结构的概念可知，在经济生态系统中，同样的成分由于结构方式不同、时间组合不同、空间配置不同，可导致不同的功能。

（二）经济生态系统结构方式

经济生态系统是一个多成分、多层次的网络结构。不同类型和不同复杂程度的经济生态系统，其结构网络状况各不相同，但都包括三个最基本的要素，即链式结构、面式结构和立体结构。

1. 一维链式结构

链是经济生态系统结构的基本单元，体现着要素之间物质能量循环转化的关系。根据功能作用的不同，经济生态系统的结构链大体上可分为食物链、生产链、交换链和技术链四种形式。

(1) 食物链

通常营养级较多的长食物链，可以增强系统的稳定性。因为当某一营养级缺损时，其余营养级可以相互协调、重新组合，以保持能量传递的顺畅。因此人们在进行生态设计时，利用这一“长路反馈”原理，增加食物链的环节，以维持和增强系统的稳定性。

在经济生态系统中，既存在这种自然的食物链，也存在类似于食物链的消费关系，比如农副产品加工业，以农副产品为原料，生产出产品供人类消费之用。我们可把这种消费关系看做是食物链的延伸和扩展，称作经济生态链。显然，经济生态系统中的经济生态链，已不是完全自然的食物链，技术经济要素已渗透其中，人类可以对其进行必要的调节、设计和重组。

(2) 生产链

这是经济生态系统中的一条主链，它反映系统的总体功能结构。这里所指的生产既包括经济系统的经济再生产，也包括生态系统的自然再生产，以及这两种再生产相互交织的、统一的经济生态再生产。比如在农业生态系统中，生产链是由食物链和经济生产链构成，即太阳能和其他环境要素—植物—动物—加工，或植物—加工，再进入流通和消费过程。在工业生态系统中，生产链也包括自然生产和经济生产两部分。

不难看出，这种经济再生产过程和前面所讲的自然再生产过程是无法截然分开的，尤其是在农业生态系统中，这两种再生产更是紧密地交织在一起的。比如棉花生产既是经济再生产，同时也是植物通过光合作用将太阳能转化为化学能、将无机物转化为有机物的生物生产过程。

(3) 交换链

交换链是经济生态系统中价值流的一种运动形式，它是维持系统物质循环和能量流动必不可少的过程。比如，农业生态系统生产出的农产品，并不能直接参与下一个农业

生产过程的物质循环，为了使物质循环得以继续进行，必须经过交换将其转换成资金，然后再转换为下一个生产过程所需的种子、化肥、机械等产品。显然，在这一转换过程中，资金起着中介的作用。正是由于经济生态系统交换链的作用，才使经济生态系统的物质循环和能量流动不至于中断，保持了系统生产的连续性。

(4) 技术链

经济生态系统结构各要素经过食物链和生产链相互连接，这一过程并不是自发进行的，它是在人为调控作用下随着人类运用科学技术进步的程度而变化。因此，生态系统和经济系统之间的基本联系是技术链。科学技术水平的高低，决定着生态系统与经济系统联系的广度和深度，从而也决定了生产的规模和速度。

食物链、生产链、交换链和技术链的综合，共同构成经济生态系统的一条经济生态链，即生态系统-自然再生产-加工-产品-消费-废物-生态系统。由此可知，经济活动实质上是地球生物圈物质循环的一段过程。

2. 二维面式结构

面式结构是经济生态系统中链式结构的平面组合。它在分布状况上表现为三种配置格局。一是均匀分布，结构链的分布大体上是均匀的，在二维面上各占一定的面积，比如在沙漠中，由于对土壤水分的需求，不同植物各自占有一定的吸收面积，水-植物的若干链处于近乎均匀状态。二是斑状分布，比如干旱草原或海滨地带的碱蓬，随着土壤碱斑而呈团块状分布。三是随机分布，各链在分布上彼此独立，但分布不规则。通常，二维结构面的分布多数都呈随机分布。

3. 三维立体结构

三维立体结构，也称立体结构或三维结构。事实上，在经济生态系统中，独立的结构链和结构面是不存在的，它们总是与其他结构链或结构面相互交织在一起，构成一个网络状的多维立体结构。

所谓立体经济生态结构是指生态要素、经济要素和技术要素依据各自的特性，配置在不同的空间层次，占据各自的经济生态位所构成的多维结构网络。常见的经济生态立体结构有：

(1) 人口聚落立体网络

人口聚落立体网络，主要分布在城市生态系统中，并与经济网络密切结合在一起。由于城市生态系统本身就是典型的立体网络结构，其生产链、加工链、交换链等在多维空间中相互交织，物流、能流、价值流、信息流在其间传递、流动，构成立体的循环体系。所以，作为城市生态系统组成部分的人口聚落也必然呈立体网络结构。

(2) 种群立体结构网络

种群立体结构网络主要分布在农业生态系统或农村生态系统。它可以使多种种群充分利用一定空间中的生态、社会、经济、技术等资源，其结构形式如图 17-2。

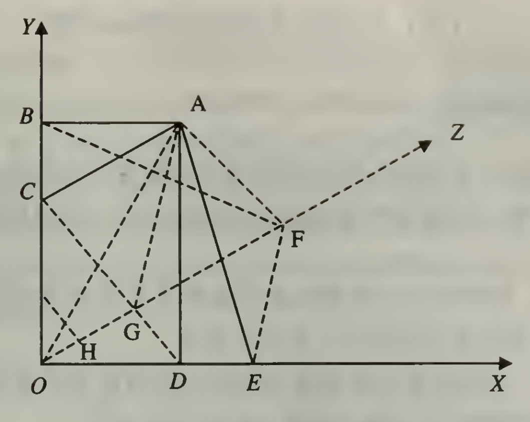


图 17-2　种群立体结构网络

在图 17-2 中，*X* 为经济要素维，*Y* 为技术要素维，*Z* 为生态要素维。种群 A 处在经济生态位上，可以分别与种群 H、G、F 交换物质和能量，又受技术和经济要素 *B*、*C* 和 *D*、*E* 的控制。*O* 点可理解为分别向 *X*、*Y*、*Z* 输入物质和能量的总的源泉，这就形成了以种群为主体的立体结构网络。农业生态系统或农村生态系统都是这样的多维立体结构网络。

(3) 立体经济生态网络

在经济生态系统中，生态系统与经济系统之间的能量、物质交换，实际上包括 4 个网络，即化学潜能、矿物能源、势能和矿物生产网络。其中每条物流、能流渠道都可以构成若干网络层次。这些网络层次共同构成立体经济生态网络。

三、经济生态系统的功能

(一) 经济生态系统功能的概念

经济生态系统的功能是指具有一定经济生态结构的经济生态系统在外部环境的作用下，所表现出来的特性和能力。这种特性和能力是经济生态系统中生态功能和经济功能复合的结果，外在表现形式为生产功能、生活功能和净化还原功能(图 17-3)。

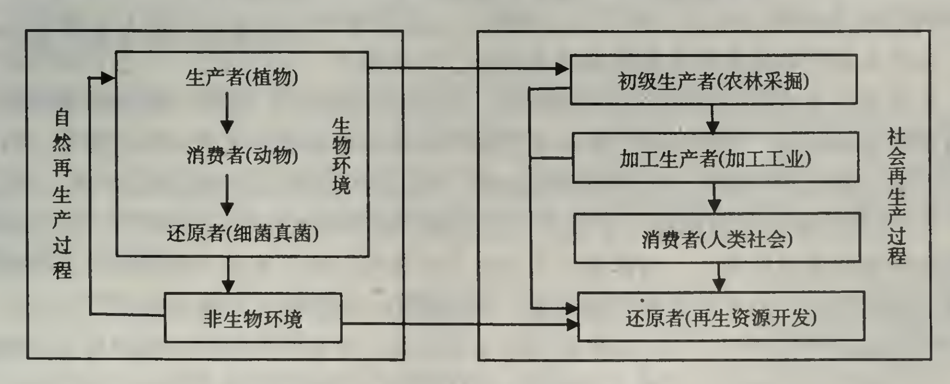


图 17-3　经济生态系统内部关系示意图

(二) 经济生态系统的基本功能

1. 经济生态系统的生产功能

经济生态系统的生产功能是人类开发利用自然资源，为社会提供满足人类需求的各种产品的能力。这种能力表现为经济生态系统的生产力，它包括自然生产力、社会劳动力和科技生产力。

1) 自然生产力。自然生产力是指生态系统所具有的物质循环和能量转化的能力，它是在自然规律的作用下自发形成的一种生产能力。

2) 社会劳动力。社会劳动力是指作为经济人的劳动者所具有的劳动能力，经济生态系统的社会劳动力包括体力劳动力和智力劳动力两大类。

3) 科技生产力。科技生产力是人类在运用自然力，利用和改造自然过程中积累起来的知识和技巧，是使蕴藏于自然环境中的资源转化为现实的生产力的最有力的手段。

4) 经济生态系统的生产功能分类。经济生态系统是在自然生态系统的基础上建立的经济-社会-自然复合系统，它的生产功能包括了自然生产力、社会劳动力和科技生产力。这三种生产力的有机耦合构成经济生态系统的生产力，它分为初级生产、加工生产、流通服务和信息生产四个类型：① 初级生产。包括生物资源的生产(初级生产、次级生产)和非生物资源的开采(采矿、挖煤等)，它构成经济生态系统最基本的物质生产。② 加工生产。包括加工、制造等产业，它是利用系统中初级生产的产品进行再生产的过程。③ 流通服务。包括金融、商业、交通、服务等产业，它的存在可保证经济生态系统能流、物流、信息流的正常运转。④ 信息生产。包括科技、教育、咨询等产业，它的存在可促进经济生态系统生产力水平提高。

2. 经济生态系统的还原功能

自从人类社会产生以来，人类通过生产和消费活动，一方面向自然界索取生存资料，一方面又将经过改造和使用的自然物质和各种废弃物归还给自然，参与自然界的物质循环和能量交换。在正常情况下，经生产和生活过程产生的废弃物经过一系列自然发生的物理、化学、生物等过程，在一定的时间内可以使生态系统自动恢复原来的状态。在自然生态系统中，完全依靠自然的净化还原作用实现这一转化过程。但随着社会生产力和科学技术的突飞猛进，世界人口激增，人类征服和改造自然的能力和规模大大加强。由于人类活动排放的各种废弃物呈急剧上升的趋势，远远超过了生态环境的自净能力，从而导致全球性生态危机和环境退化。要缓解和扭转这一趋势，就必须解决滥用自然资源和污染问题，这些问题的解决要借助于经济生态系统的还原功能，因此，确立经济生态系统的还原机制是十分必要和紧迫的，它包括自然和人工两方面的内容。

1) 自然的净化还原功能。自然的净化还原功能是指环境受到污染后，自己能够恢复到未污染状况时的能力。这种能力是通过自净作用反映出来的。自然的自净作用是指环境受到污染后，由于本身的代谢功能，在物理的、化学的、生物的作用下，经过一定的自然降解和同化作用，使环境恢复到本来的面貌。按自净作用发生机理可分为物理净化、化学净化和生物净化三种。自然界的水体自净、大气扩散和土壤净化均是物理、化

学、生物三种机理的单一或复合的作用(详见第八章)。

2) 人工的净化还原功能。人工的净化还原功能是在人为作用下，减少进入环境的各种废弃物，并利用自然净化机理，将各种进入环境的废弃物进行集中快速处理，消除其对生态系统的危害，恢复系统正常功能的能力(详见第八章)。

3) 经济生态系统的生活功能。经济生态系统除了具有生产、净化还原功能外，它还可以为动植物，特别是人类提供栖息地，使生物、人类得以生存、繁衍和发展。因此，经济生态系统的生产功能、生活功能和净化还原功能相互配合，协调发展，是系统得以正常运转的根本保证。

(三) 经济生态系统功能的动态特征

1. 经济生态系统的物质循环

经济生态系统的物质循环，可分为自然物流和经济物流两大类。

1) 自然物流。自然物流是指生态系统的物质循环。它的循环分别在三个不同级别上进行。一是在生物个体水平上，自然界的某些无机物，被生物体吸收，进行的一系列生物代谢活动。二是在生态系统水平上进行的营养物质循环，在第一性生产者代谢活动的基础上，通过中间各级消费者的代谢，最后由分解者还原归还于环境的循环过程。三是在生物圈各层间进行的生地化循环，按循环形态可分为水循环、气态循环和沉淀循环(详见第二章)。

2) 经济物流。经济物流是指社会经济系统的物质循环。它是通过人的经济活动，在社会再生产过程的各个经济部门间所形成的物流。它可分为三种类型：一是直接生产过程中的物流，自然物流进入经济系统以后，经过人为作用，改变了其形态，变成人类所需的商品，同时也产生部分废弃物返回环境，参与生态系统的物质循环过程。二是流通过程中的物流，商品在交换中，随商品流而产生的物质流通过程。流通过程中的物流是商品的实体运动过程，是连接生产物流和消费物流的纽带。三是消费过程中的物流，物流最终进入消费过程，改变了其形态，并以废弃物质的形式返回环境，参与生态系统的物质循环。经济生态系统的物流，就是生态系统物流与经济系统物流的有机结合，即按一定方式进行融合交换及循环运动的过程。

2. 经济生态系统的能量转化

经济生态系统的能量流动，可以分为自然能流和经济能流两大类。

1) 自然能流。自然能流包括太阳辐射能流、生物能流、矿物燃料能流和各种潜在的能流。它主要是通过绿色植物的光合作用，把太阳能转化为化学能贮存于有机物中。并且，这种化学能又沿生态系统的食物链(食物网)的营养级依次流动。食物链(食物网)是能流的主要渠道。

2) 经济能流。经济能流是指自然能流被投入到经济系统后，沿着人类有目的的经济行为需求方向，通过开采、加工、贮藏、消耗、废弃的序列，进行传递与转化的过程。食物链、生产链是经济能流的主要渠道。经济生态系统的自然能流和经济能流可以

互相转化。自然能流可以通过直接获取现成的自然能源、运用科技手段开发太阳能等新能源、通过矿物能源开采、通过养殖业生产等途径，转化为经济能流。

3) 经济生态系统能流的特点。经济生态系统能流有两个特点：① 能量流是单程流，是不可逆的过程。能量既不能产生，也不能消灭，它只能从一种形式转化为另一种形式。在经济生态系统中，能量沿食物链、生产链传递，能量在各种生产和消费领域中被消耗后，均不能以原来的能量形式返回到原来领域再重新利用。② 能量流动的递减性。能量在经济生态系统内及系统之间流动逐级递减，能量的传递遵循热力学定律。如果没有新的能量投入，则原来的能量流直至以废热形式全部耗尽、散失。因此，经济生态系统，尤其是经济系统是不能停止能量输入的。生态系统能量转化效率基本上是按照林德曼“十分之一定律”进行传递的。而经济系统的能量递减与生态系统不同，它没有一个大体的数量规律，只是在 0~1 之间波动。因此，经济生态系统要维持自身的运转，就必须不断地从外界输入能量。

3. 经济生态系统的信息传递

信息是客观事物的属性、联系和表现的特征，它是客观事物再现性的反映，即是物质运动的外化，信息具有物质的特殊属性。信息流在经济生态系统中，具有十分重要的作用。

1) 信息是经济生态系统发展的资源。信息同物质和能量一样，是经济生态系统发展不可缺少的资源要素，任何一个系统，如果忽视了信息资源的开发和利用，必然导致系统的损害，发展停滞。比如在农业生态系统中，农作物的播种、田间管理、收获等，必须依靠气象信息、技术信息等。

2) 信息传递是管理经济生态系统的基础和关键。对经济生态系统而言，信息的基本作用就是增强系统的有序性。没有物质，就没有系统；没有能量，系统就会消亡；没有信息，物质和能量只能形成一个浑浊、杂乱的系统。因此，经济生态系统要实现有效管理，必须及时获得足够的信息，传输足够的信息，产生足够的信息，反馈足够的信息。只有以一定的信息为基础，管理才能驱动其运行机制，只有有足够的信息，才能保证管理功能的充分发挥。

3) 信息传递是经济生态系统调控的核心。经济生态系统的发展作为一个动态过程是必须要进行调控的，而调控的核心就是信息。因为，调节控制决策以信息为依据，决策的实施依靠信息传递，控制过程中有信息产生与反馈。因此，信息传递与物质循环、能量转化一样，是经济生态系统的重要特征。

4. 经济生态系统的价值流及其增值

价值的质的规定性是指凝结在商品中的无差别的人类劳动或抽象劳动。价值的量的规定性是指社会必要劳动。价值流是指价值形成、增值、转换和实现的过程，它不具有自然形态。

价值流的形成和增值，要经过流通-生产-流通三个阶段，并相应地采取货币、生产、商品三种不同的形态。在第一个流通阶段，是新价值形成和价值增殖的准备阶段。劳动者与劳动资料相结合进入生产阶段，这是新价值形成和增值的决定性阶段。最后，

又通过流通过程，把生产出的产品变成商品形态再转化为货币形态，并重新进人新的循环运动，这一过程是价值的实现阶段。价值在生产阶段属于经济生态范畴的运动。因为，经济生态系统是生态系统和经济系统构成的复合系统。在经济系统中，由于人类的参与，向系统输入了劳动力，从而产生了新价值，并且，这种价值附着在产品上，随产品的加工生产，沿食物链和生产链不断复利增值。因此，价值流是经济生态系统的重要功能。

5. 经济生态系统的人口流

人口是指生活在特定社会制度、特定地域，具有一定数量和质量的人的总称。由于人既是生产者，又是消费者，因此，人口对社会经济的发展和生态系统的影响重大。当人口的数量、质量和增长率与社会经济发展要求相适应时，对生产力的发展起促进作用；反之，则起阻碍作用，甚至会导致社会经济的停滞与破坏，对社会生活产生严重影响。人口流是指在经济生态系统发展过程中，由于人口本身内在原因的变化和外在条件的影响，人口的时空变化过程。人口流包括人口的自然变动、迁移变动和社会变动，它对社会经济和生态系统的影响极大。

(四) 经济生态系统的功能渠道

虽然经济生态系统是一个物质、能量交换立体网络，但概括地看，只有四条渠道(图 17-4)。

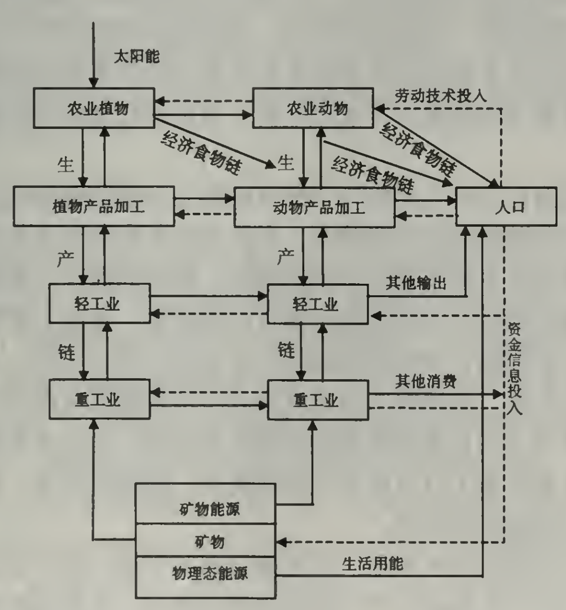


图 17-4　经济生态系统功能示意图

1) 化学潜能和有机物质交换渠道。绿色植物把太阳能转化为化学潜能，同时有机产品沿太阳能→植物→动物→加工或植物→加工进人交换和消费领域，有机废弃物又归

还生态系统，这一交换渠道是由农业、轻工业(比如食品加工、纺织工业等)完成的。

2) 矿物能源转化渠道。矿物能源主要有矿物燃料和核能，它们转化为二次能源，作为动力能推动国民经济运转。其主要环节有生态系统→二次能源→农业，二次能源→工业，二次能源→交通运输，二次能源→民用等。也有少量矿物能源作为工业原料被加工成各种化工产品。

3) 物理态能源转化渠道。太阳能、风能、水能、海浪能和潮汐能等可被直接转化为二次能源，作为动力输入国民经济各部门。目前除水能外，其他能源的开发技术尚不成熟。但这些能源属于清洁和可更新能源，是未来发展的战略能源。

4) 矿产资源的循环渠道。矿产资源的循环渠道包括全部金属和非金属矿物的循环在内，但这基本上是不可逆过程。比如在铜矿→开采→冶炼→加工→产品→消费→归还生态系统的过程中，铜元素与其他成分分离，其废渣和废旧铜制品不会再化合成铜矿。

值得注意的是，在以上这些物流和能流转化过程中，除了物理态能源外均会产生有机、无机污染物。这些污染物沿食物链转移、富集，并最终危害人体健康。所以，治理污染的关键是要采用无(或少)废工艺系统，进行清洁生产，尽量减少废弃物的产生。

四、经济生态平衡

(一) 经济生态平衡的概念

经济生态平衡是指经济生态系统在一定时间内结构和功能的相对稳定状态，其物质和能量的输入输出接近相等，在外来干扰下，能通过自我调节(或人为控制)恢复到原初的稳定状态。它是经济生态系统所呈现的生态平衡与经济平衡相对统一、稳定的动态平衡状态。经济生态平衡不仅包括人工生态平衡，也包括自然生态平衡中符合社会经济发展目标的部分。

自然生态平衡是指在没有人的参与下的自然生态系统的平衡状态，是生物个体或种群依据自然规律逐渐演替形成的平衡状态。自然生态平衡的形成是自然选择和自然淘汰的结果。因此，自然生态平衡有益于生物的繁衍、物种的保存、资源的涵养、环境的改善。在社会经济发展过程中，人类过度干预自然的结果，造成了物种衰退、资源枯竭、环境恶化等一系列生态问题，最终危及到人类自身的生存与发展。人工生态平衡是在人的参与下形成的生态平衡，是系统在自然规律和经济规律双重作用下形成的平衡状态。它是在人的干预和作用下的自然选择和自然淘汰的结果，是生态平衡与经济平衡协调的产物。因此，人工生态平衡不仅有益于生物的繁衍、物种的保存、资源的涵养、环境的改善，而且有益于社会经济的发展。

生态平衡与经济平衡是相互联系、相互制约的对立统一体。生态平衡是经济平衡的基础，而经济平衡反过来又影响生态平衡的实现。因此，人类可在遵循生态规律与经济规律的前提下，运用科技手段对经济生态系统进行适度的调控，建立高层次的经济生态平衡体系。

（二）经济生态平衡的特征

1．经济生态平衡具有相对性

经济生态平衡具有相对性特征，表现为其时间相对性、空间相对性和条件相对性。经济生态平衡的时间相对性是指在不同的时间上，其平衡的状态和具体内容是不完全相同的。由于系统本身和它所处的环境条件都会发生变化，因此在不同时间上，平衡就会有差别。它的空间相对性是指一个经济生态平衡在不同的地域空间上，因地域条件的变化，其平衡的状态和具体内容也会有所不同。而它的条件相对性，则是指一个经济生态平衡在其所在的自然和经济条件发生变化时，它的具体平衡状态和内容也就会与原来的有所不同。

2．经济生态平衡具有动态性

经济生态平衡是建立在耗散结构基础上，通过生态系统和经济系统各要素之间的协同作用，所产生的结构有序与功能协调的动态平衡。但这种平衡不是静态的平衡，而是具有涨落的稳态。一个远离平衡态的开放的经济生态系统，当外界和内在的条件变化到某一值时，通过涨落作用，系统便可发生突变，由原来的无序状态形成新的有序的结构，即耗散结构。由于经济生态系统具有自组织和自我调节能力，这种能力就构成了经济生态阈限。当涨落的冲击力没有达到经济生态阈限时，经济生态系统可以维持和恢复原有的平衡，这时系统的物质循环、能量转化、信息传递等运动依然进行，这就构成了经济生态系统内在的动态性。当涨落的冲击力超过经济生态阈限时，原来的经济生态平衡崩溃，在新的条件下又形成新的平衡。随着时间的推移，这种演化过程还会永无止境变化下去，这就构成了经济生态系统外在的动态性。因此，经济生态平衡是不断运动、发展、变化的动态平衡。

3．经济生态平衡具有可调控性

经济生态平衡是相对稳定的动态平衡状态，这不仅说明经济生态系统及其运动过程是有序的，人们可以通过认识其运动的规律性，调节和控制经济生态系统的演替、进化过程，而且也反映了经济生态系统具有一定的可塑性，在适度范围内，人们可遵循生态规律和经济规律，调节生态平衡和经济平衡，使经济生态系统朝有利于人类的方向发展，为人类提供更多的产品与服务。但经济生态平衡具有可调控性并不意味着人类在自然面前可以为所欲为，因为经济生态平衡的可调控性是有条件的，它决定于人类对自然规律和经济规律认识的程度和驾驭的能力。在一定的社会经济发展阶段和一定的科学技术发展水平下，人类对自然规律和经济规律的认识是有一定局限性的，人类掌握、运用技术的手段也是有一定局限性的。因此，经济生态平衡可调控程度在一定时空条件下也是有限度的。人类不能超越自然规律和经济规律，夸大自身的作用，盲目地对经济生态系统进行调控，否则，必将导致系统崩溃。

五、经济生态效益

（一）经济生态效益的概念

1. 经济效益与生态效益的概念

经济效益是指在社会再生产过程中，劳动占用和劳动消耗同劳动成果的比率。生态效益是指生物种群的物质和能量转化效率及维持生态环境稳定的能力。

2. 经济生态效益的概念

经济生态效益是指社会物质资料生产过程中同时产生的具有一定的经济效益和生态效益的综合与统一。它是经济产出和生态产出的综合同劳动占用和劳动消耗量之比，也即社会生产和再生产过程中，人们所获得的经济生态成果与消耗的活劳动和物化劳动之比。经济生态效益可以表示为：

经济生态效益=经济生态成果/劳动占用和劳动消耗量

可见，经济生态效益是经济效益与生态效益的结合与统一，它集中反映了经济生态系统的整体性、协调性和有序性及其程度。正确地认识和理解经济生态效益，有助于人们科学地分析劳动成果同劳动投入的对比关系，有助于人们在社会生产实践中自觉地遵循经济生态规律，以提高经济生态效益。

（二）经济效益与生态效益的关系

在经济生态系统中，经济效益与生态效益存在着复杂的对立统一关系。首先，生态效益是经济效益的基础；其次，经济效益的提高又为生态效益的改善提供了条件。遵循经济生态规律，经济效益和生态效益就可以在较好的基础上达到统一，经济生态系统实现良性循环。反之，如果违背了经济生态规律，经济效益和生态效益就会出现对立，导致经济生态系统萎缩，呈现恶性循环。因此，在社会生产中，如果注意把经济效益与生态效益结合起来，使二者相互促进，相得益彰，就能达到既促进经济发展，又保护生态环境，提高经济生态效益的目的。

（三）提高经济生态效益的途径

经济生态效益是经济效益与生态效益的综合和统一，它具有多层次性、多方面性特征。提高经济生态效益，要求人们必须自觉地遵循经济生态规律，从生态、经济、技术等角度，宏观、微观层次综合考虑，利用经济、技术、法律等手段，加强经济生态系统管理，合理利用与保护自然资源，建立结构和功能最优的高效经济生态系统，发挥其最佳经济生态效益。

六、经济生态系统的演替

经济生态系统演替是生态系统演替和经济系统演替的统一，它突出表现为社会经济主导下的急速多变的演替过程。从经济生态结构进展演替的次序看，大致经历了三大阶段。

（一）原始型经济生态系统演替

原始型经济生态系统演替，是生产力发展水平极低条件下的产物。它主要存在于人类社会早期。在自然、半自然经济条件下，生态系统与经济系统只能形成比较简单的经济生态结构，其主要特点是生态系统完全主导着经济生态系统的演替，起中介作用的技术手段简单、效率低，资金要素不参与经济系统结构的形成，演替速度慢、规模小，并在生态阈限内进行。因此，这种演替可以称为原始意义上的协调型。比如，在大约 1 万年前，世界人口大约有 500 多万，以 5000 多种植物为食。自然生态系统的食物可以说是取之不尽、用之不竭，但这是低下的、原始的协调。

（二）掠夺型的经济生态系统演替

掠夺型的经济生态系统演替，主要表现在以矿物燃料利用为主的发展阶段。它主要是指经济系统通过技术手段，以掠夺的方式同生态系统进行结合的一种演替方式，其主要特点是具有明显的人为操纵、经济主导特征，具有极强的同化和吸收自然资源的能力以至于使资源产生枯竭的趋势，具有因大量污染物排放而使环境质量迅速下降的特征。

掠夺型的经济生态系统演替，具有脱离生态规律约束片面追求经济增长的演替倾向。这种演替虽然在一定时期内可使经济迅速增长，但这种增长是以破坏资源和环境为代价的。所以，当资源和环境损害到一定程度出现严重衰退时，便会成为制约经济增长的严重障碍。

（三）协调型的经济生态系统演替

协调型的经济生态系统演替是指经济系统通过科技手段与生态系统结合成高产、高效、优质、低耗、多层次相互协同进化发展的经济生态系统的演替方式，也即社会经济可持续发展阶段的经济生态结构特征。这种协调型经济生态系统是当前人类正努力建造，未来将普遍存在的一种先进的经济生态系统类型。其主要特征表现为经济系统与生态系统各要素是互补互促的协调关系，协调型经济生态系统演替具有不危及生态环境的特点，经济系统对生态系统的作用不会危及生态环境质量，经济生态系统内总有负熵流的输入或存在。

第三节　经济生态系统面临的问题

一、资源危机

(一) 矿产资源耗竭

矿产资源是指经过漫长的地质年代形成的不可再生资源，包括金属和非金属矿产资源。矿产资源由于不断地开采，储量在逐渐减少。特别是由于现代工业的加速发展，不少矿种已接近枯竭。比如能源矿产，其消耗占目前人类能源总需求的90%以上，并且其需求量仍以每年 3%的速度增长。据估计，全球的石油、天然气只能够用几十年，煤的储量较多，但最多也只能继续开采 300 年左右。其他矿产资源的形势也不容乐观，大多数矿产资源将在 100~200 年内枯竭。我国矿产资源形势不容乐观，人均矿产资源占有量不到世界平均水平的一半，居世界第 80 位，而且后备探明储量不足，随着工业经济的快速发展，矿产资源短缺的形势将日趋严峻。比如我国主要矿产品现已供不应求，铁矿、锰矿、铬矿的进口量逐年上升，铜、铝、铅、锌、锡等有色金属也早就开始进口。由于矿产资源紧缺，导致能源、钢铁、有色金属、化工等原材料供给紧张，许多工厂开工不足，使 1/4 的生产能力得不到发挥(详见第十章)。

(二) 水资源短缺

地球 70%以上的表面为水所覆盖，素有“水之行星”之誉。但地球总水量的 97%是海水，在 3%的淡水中，有 2.8%是难以利用的潜水，只有 0.2%左右可为人类利用。随着人口激增和经济迅猛发展，缺水已成为世界性问题。据统计，现在全世界淡水消耗量每年增加 2.5%，比人口增长率高出 1 倍。全球已有 100 多个国家缺水，其中有 40 多个国家严重缺水，占地球陆地面积的 60%。许多农田因干旱而颗粒无收，大城市超采地下水的情况相当普遍。同时，水污染进一步加剧了水资源短缺。全世界每年向江河湖泊排放的各类污水达 4260 亿 t，造成全球径流总量的 14%被污染。中国为全球人均水资源量少的 13 个贫水国家之一。人均淡水资源仅 2400m^3，相当于世界人均量的 1/4。全国每年缺水 350 亿 m^3 左右，有一半城市缺水，100 多个城市严重缺水。全国有 2.4 亿人口、1.5 亿头牲畜饮水困难。而且七大水系有一半河段污染严重，一半水体不符合渔业水质要求，1/4 的水体不符合农业灌溉水质要求。预计 21 世纪的水危机将进一步加剧，水正在演变成为地缘政治中一个具有爆炸性危险的问题(详见第十章)。

(三) 植 被 破 坏

1. 森林锐减

历史上，地球曾经有 76 亿 hm^2 的森林，到 19 世纪降为 55 亿 hm^2。进入 20 世纪以后，森林资源受到严重破坏，目前全球森林仅剩 28 亿 hm^2，并仍在迅速减少，每年减

少 100 万~200 万 hm^2。据联合国粮农组织的统计，自 1950 年以来，全世界森林已损失一半(主要是发展中国家)。其中减少最多的依次是中美洲(66%)、中非(52%)、东南亚(38%)。热带森林砍伐每年几乎达 1700 万 hm^2，森林砍伐率由 1976~1980 年的 0.6%增加到 1981~1990 年的 1.2%。全球森林平均以每年近 1500 万 hm^2 的速度减少，其中热带森林以每年近 1000 万 hm^2 的速度消失。中国森林资源状况更为可虑，目前全国森林覆盖率仅有 19.4%，仅为全球平均水平(31.4%)的 61.78%。虽然 1949 年以后开始了大规模的植树造林活动，但森林破坏更为严重，每年损失森林 246.7 万 hm^2。森林破坏加剧了水土流失、土地荒漠化、生物多样性减少等，对生态环境带来了难以估量的损害，将严重威胁人类的可持续发展。

2. 草场退化

全球草场面积约 30 亿 hm^2，占全球陆地面积的 22%。草场不仅具有巨大的生产力和经济价值，而且有重要的生态意义。然而不合理开垦与过度放牧，重用轻养，导致草场退化、土地侵蚀和荒漠化。目前，由于过度放牧或野生动物过分啃食及随后发生的土壤侵蚀等，使世界各地草场都有不同程度的退化，尤以发展中国家的草场退化最为严重。我国草场由于过度放牧和管理不善，退化、沙化和碱化现象十分严重(见第五章)。

(四) 土地资源危机

1. 人均耕地面积下降

世界耕地面积的增长不及人口的增长，所以全球人均耕地面积日益减少。据估计，从现在起到 2025 年，人均耕地将从 0.28 hm^2 下降到 0.17 hm^2，而亚洲将从目前的 0.15 hm^2 下降到 0.09 hm^2。中国虽用占世界 7%的耕地养活了占世界 21.3%的人口，但人均耕地仅有 0.078 hm^2(1995)，不足世界平均水平的 1/3，人口增长与耕地减少的矛盾突出。

2. 土地退化

全球荒漠化面积占陆地面积的 1/3，并以每年 600 万 hm^2 的速度扩展。同时水土流失使每年有 240 亿 t 的表土经过河流冲入海洋。中国是世界上荒漠化最严重的国家之一，且近年来荒漠化呈急剧发展的态势，20 世纪 50~60 年代，沙化土地每年扩展 15.6 万 hm^2，70~80 年代，沙化土地每年扩展 21 万 hm^2，90 年代以来，沙化土地每年扩展 24.6 万 hm^2，目前全国荒漠化面积已达 26 220 万 hm^2，占国土面积的 27.3%(详见第十一章)。

二、环 境 污 染

(一) 酸 雨 蔓 延

酸雨是指大气污染后产生的 pH 小于 5.6 的酸性降水。它主要是由矿物燃料燃烧产

生的硫氧化物(SO_x)和氮氧化物(NO_x)等大气酸性污染物构成。据估计，全球每年人为排入大气的硫氧化物约 2 亿 t、氮氧化物约 1.5 亿 t，其中二氧化硫约 1.5 亿 t。在工业化国家，90%的二氧化硫是人类活动所排放的，主要来自炼油厂、热电厂和冶炼厂等。中国二氧化硫排放量高达 1396 万 t(1996)，酸雨区已覆盖国土面积的 40%，尤以长江以南和四川盆地的酸雨污染最为严重。

酸雨素有“空中死神”之称，它造成的损失是难以估量的(详见第八章)。

(二) 臭氧层破坏

大气中 90%的臭氧(O_3)存在于平流层中，简称臭氧层。它对紫外线具有屏障作用，从而对地球生物的生长发育起到保护作用。但是，由于大量的氟氯烃(CFC)和哈龙等物质的排放，使臭氧层日益稀薄，目前南极和北极已出现臭氧层空洞。臭氧层破坏，导致一系列灾难性的后果，比如皮肤癌等疾病增多、农作物产量和质量下降、温室效应增强、水体浮游生物生长受到破坏、光化学烟雾污染等，给地球上的生命系统带来难以估量的损害。研究表明，大气中臭氧如果减少 1%，紫外线对地球表面的辐射将增加 2%，皮肤癌增加 4%。如按现在的速度计算，到 2075 年，臭氧将比 1985 年减少 40%，全球皮肤癌患者将达 1.5 亿人，白内障患者达 1800 万人，农作物产量将减少 7.5%，水产品将减少 25%，人体的免疫功能也将减退，因此臭氧浓度的减少趋势及其严重后果已引起世界的极大关注。

(三) 气 候 变 暖

大气中二氧化碳、甲烷、氧化亚氮、CFC 等温室气体浓度增高，会导致全球增温。在过去的 100 年中，全球气温平均升高了 0.4~0.6℃。据科学家预测，如果按照目前的发展趋势，到 2030~2050 年，大气中二氧化碳的含量将达到 550μg/g 以上，全球气温将升高 1.5~4.5℃。气候变暖的后果对人类来说是灾难性的，它将使全球降水量重新分配，冰川和冻土融化，海平面上升。据美国环保局研究，如果温室气体继续按目前的速度释放，估计到 2025 年海平面将升高 10~40cm，到 2100 年海平面将升高 60~200cm，那么，现在 30%~80%的沿海沼泽和许多地势低洼的岛屿将被海水淹没。气候变暖将导致气候带和自然带的变化，使亚热带向北扩展，北极地带的夏季明显变暖，作物的生长期大大延长，使半干旱的热带地区变得更加干旱、水位下降，森林、草场火灾加重，并加快土地荒漠化。气候变暖将使不少地区的自然灾害增加，使高低纬度地区降雨量猛增而成涝灾。气候变暖还可引起气温急剧变化，使许多生物难以生存，加剧物种灭绝。同时，气候变暖还可能使病虫害增加。

(四) 固体废弃物猛增

固体废弃物是指被丢弃的固体和泥状物质，包括城市垃圾、工业废物、农业废

物、放射性废物以及从废水、废气中分离出来的固体颗粒，简称废物。据统计，全世界每年产生各种固体废弃物约 100 亿 t，其中约 3%~5%为有毒有害的危险废弃物，并且其增加速度在加快。这些固体废弃物对生态环境造成了越来越严重的危害，它们不但需要占用大量的土地堆放，浪费土地资源；而且还通过各种途径污染大气、水体、土壤、生物，并危害人体健康。不少国家和地区把废弃物直接倾倒到河流、湖泊、海洋，严重污染了水质，减少了水体面积，甚至淤塞河道。废弃物中的尾矿、粉煤灰、粉尘等会随风飞扬，吹到很远的地方，污染大气。许多废弃物在被焚烧或经风吹、日晒、雨淋后，会散发出有恶臭毒气，污染大气，同时还会形成一些有毒、有害成分向地下渗透，污染土壤、地下水，杀死土壤微生物，使土壤质量下降，妨碍植物根系的生长或在植物体内积聚，并沿食物链迁移、富集，危害人体健康。

三、人口过剩

自产业革命以来，世界人口急剧增长，全球人口每增加 10 亿所需的时间越来越短(表 17-1)。预计到 2100 年世界人口将达到 100 亿，地球上可供人类享用的资源越来越难以满足日益增长的人类的需求。并且，越是贫穷的欠发达国家和地区，其人口增长越快， 而发达国家和地区已进入人口负增长阶段。这种状况将导致贫富差距进一步扩大和世界人口总体素质下降。人口数量的急剧增加和人口素质的相对下降，将危及人类自身的生存和发展，并导致生态环境的进一步恶化。

表 17-1 全球人口每增加 10 亿所需时间

人数 /亿	年代	时间间隔 /a
10~20	1830~1930	100
20~30	1930~1960	30
30~40	1960~1974	14
40~50	1974~1987	13
50~60	1987~1999	12

四、生态系统退化

(一) 生物多样性减少

生物多样性包括遗传多样性、物种多样性和生态系统多样性。经过生物界长期进化，地球上现有的生物物种大约有 500 万~3000 万种。然而，由于生态破坏，物种自 1600 年以来已有 724 种灭绝，目前有 3956 个物种濒危，3647 个物种易危，7240 个物种珍稀。据估计，如果一个生境的面积减少 90%，大约一半的物种就会失去。若以目前的速度砍伐森林，则地球上物种的 1/4 将在未来 20~30 年内消失。我国是世界上生物多样性最丰富的国家之一，高等植物和野生动物物种均占世界的 10%左右，但环境污染和生态破坏导致动植物的生境破坏，使物种数量急剧减少，许多物种已濒临灭绝。据统计，目前大约有 400 种脊椎动物处于濒危或受威胁的状态，占我国脊椎动物总数的

7.7%；有 4600 种高等植物处于濒危或受威胁的状态，占全国高等植物种数的 15%以上；近 50 年来全国约有 200 种高等植物灭绝，平均每年灭绝 4 种。

(二) 生产力下降

植被破坏、生物多样性减少、环境恶化，使植物对太阳能和营养物质的利用降低，植物为维持正常生长消耗在克服各种不良影响方面的能量增多，导致净初级生产力下降，进而引起一系列不良反应。比如食物链缩短、断裂，单链营养关系增多，种间共生、附生关系减弱，生物利用和改造环境的能力降低等，这样有利于经济生态系统稳定的食物网简单化、破碎化，生物循环的周转时间变短，周转率变低，因而经济生态系统的物质循环减弱，能量流动受阻，稳定性减弱，功能失调，进而走向退化与衰亡。

五、经 济 衰 退

(一) 通 货 膨 胀

通货膨胀是指纸币发行量超过商品流通中的实际需求量所引起的货币贬值现象。通货膨胀的原因是货币的发行量过多，其实质是货币贬值，其直接表现是物价水平上涨。

从通货膨胀产生的广义因素看，主要表现在 3 方面：一是新增货币的发行量高于同期商品增加量。通货膨胀的实质是货币贬值，但引起贬值的原因，不仅仅是流通的现实货币量超过了流通对货币的需要量。因为在市场经济条件下，流通领域投放货币是商品交换的要求，投放多少货币(或发行多少货币)与商品交换量有着客观的比例关系。如果商品数量由于某种原因而经常性(或连续性)减少，并达到使这种比例关系失调的程度，那么即使货币总投放量并未增加，然而由于商品量减少，使货币总投放的相对数量增加，也会引起事实上的货币贬值。此外，由于商品本身的质量等原因，未进入流通领域，或在进入流通前，其使用价值或其效用已丧失，或者积压，尽管其价值量已被计入到产值、利润中，但其新增财富量在事实上出现了一个“负值”或“虚值”，同样会引起隐性货币贬值。二是生态失衡引起企业外在成本上升。由于生态破坏、环境污染，引起资源开采成本上升、生态供应力下降、能源价格上升、环保费用和生态恢复费用不断增加等，使企业投资增加，生产下降，外在成本上升，从而加剧了通货膨胀。三是供求关系变形引起商品价格只上不下。产业结构与需求结构的不合理也会引起通货膨胀。比如我国人口众多，对粮食及其转化产品的现实和潜在需求旺盛，造成其价格只升不降，在总货币量不变的情况下会产生潜在的持续通货膨胀。

(二) 南 北 差 距

南北差距是指发展中国家(“南方”)与发达国家(“北方”)之间的经济发展差距。由于历史和现实的原因，发展中国家在南北关系中的被动地位仍未得到根本改

善。20 世纪 80 年代以来，建立国家经济新秩序的努力遭到了极大阻力，发展中国家的经济地位受到了严重威胁，南北差距加大。首先表现在发展中国家的总体经济实力下降。整个 80 年代，发展中国家的人口占全球总人口的比重从 73.8%上升到 75.8%，而产值却从 22.7%下降到 16.9%，南北人均国民收入比从 10∶1 扩大到 16∶1。其次，发展中国家内部“最不发达国家”数目增加，由 70 年代的 36 个增加到 1991 年的 46 个。此外，80 年代债务危机的恶化也使欠债国在国际经济舞台上的活动余地和灵活性大为减少。据联合国有关资料显示，1996 年以来经济全球化进一步加大了南北差距，占全球人口不到 20%的 46 个工业化国家，拥有全球国民生产总值的 86%、全球贸易额的 82%、全球外国直接投资的 68%。在 140 多个发展中国家中，有 80 多个国家的国民收入比 10 年前减少，有 60 多个国家被排斥在经济全球化之外，在 48 个最不发达国家中有 3/4 的国家日人均收入不到 2 美元，这些国家的 6.14 亿人口平均寿命只有 50 岁，成年人一半是文盲，经济处于停滞或倒退状态，陷入恶性循环。

(三) 贫　困

贫困首先是一个经济问题，同时也是社会问题和环境问题，因为贫困的存在不仅威胁着区域的可持续发展，而且影响着整个社会的稳定、健康发展，同时给生态环境带来毁灭性的破坏。贫困分绝对贫困和相对贫困两种类型，其中绝对贫困(生存贫困，指在一定的社会生产方式和生活方式下，个人或家庭依靠劳动所得和其他收入不能满足基本的生存需求)多发生在发展中国家；相对贫困(相对低收入型贫困，指虽然解决了温饱问题，但不同社会成员和不同地区之间可能存在着明显的收入差异，低收入的个人、家庭或地区相对于全社会而言，处于贫困状态)发生在世界各地，包括发达国家和发展中国家。贫困不仅是指经济意义上的贫困，还包括社会、环境等生活质量因素。比如人口寿命状况，教育文化、医疗卫生状况，生存、生活环境状况，失业或就业不足等。贫困线是用价值表示的、为社会所接受的最低生活水准，一般以家庭人均收入能否达到维持正常生存所需要的最低生活费用支出来衡量。世界各国都有各自的贫困线标准，其数额范围(年人均收入)从发达国家的数千美元，到有些发展中国家的 300 美元不等，而且随着社会经济的发展不断调整变化。一般来说，当国家越来越富裕时，它们可接受的最低消费水平(贫困线)也会逐步提高。根据世界银行规定，目前发展中国家的绝对贫困线是人均年消费支出 370 美元。

在全球范围内，由于技术进步、市场经济体制的健全程度、地理环境、自然资源、政府政策和人口素质等的差异，世界各国社会经济发展具有明显的不平衡性，国与国之间的贫富差距相当悬殊。在广大的亚非拉欠发达国家，恶劣的地理环境对于经济的发展有着显著的制约作用，从而使得贫困人口与贫困国家在世界上相对集中地分布。目前，发展中国家的贫困人口已达 13 亿人，占全球总人口的 1/4 强。据研究，发展中国家几乎 40%的人口生活在绝对贫困范围内。大量的穷人生活在最贫穷的国家：位于南亚、印度尼西亚和非洲近撒哈拉沙漠地区。这些国家占世界总人口的 1/3，而 3/4 以上的人口属于贫困人口。在实际国民生产总值(GNP)最低的国家，贫困人口占总人口的

60%或者更多。在联合国总部，有一座 2m 多高的电子钟显示，指针每走 1 分钟，全世界便会有 47 个贫困人口诞生，一天诞生的贫困人口多达 6.7 万人。由于贫困，为了生存发展中国家不得不掠夺式开采资源、乱垦滥挖、过度使用土地、接受工业化国家污染工业的大量转移等，导致荒漠化、生态恶化、环境污染等的进一步加剧，陷入到贫困和生态破坏的恶性循环中。

第四节　产业生态建设

一、生态产业概述

生态产业是按经济生态原理和知识经济规律组织起来的基于生态系统承载能力、具有高效的经济过程及和谐的生态功能的网络型、进化型产业。与传统产业不同，生态产业通过两个或两个以上的生产体系或环节之间的系统耦合，使物质、能量能多级利用、高效产出，资源、环境能系统开发、持续利用，企业发展的多样性与优势度，开放度与自由度，力度与柔度，速度与稳度达到有机结合，污染负效益变为经济正效益(表 17-2)。

表 17-2　生态产业不同于传统产业的特征

类别	特　　征
横向耦合	不同工艺流程间的横向耦合及资源共享，变污染负效益为资源正效益
纵向耦合	从源到汇再到源的纵向耦合，集生产、流通、消费、回收、环境保护及能力建设为一体，第一、二、三产业在企业内部形成完备的功能组合
区域耦合	厂内生产区与厂外相关的自然及人工环境构成产业生态系统或复合生态体，逐步实现有害污染物在系统内的全回收和向系统外的零排放
功能导向	以企业对社会的服务功能而不是以产品或利润为经营目标，谋求工艺流程和产品的多样化
柔性结构	灵活多样、面向功能的结构与体制，可随时根据环境的随机波动调整产品、产业结构及工艺流程
软硬结合	配套的硬件、软件和心件研究与开发体系，配合默契的决策管理、工程技术和营销开发人员
自我调节	以生态控制论为基础，能自我调节的决策管理机制、进化策略和完善的风险防范对策
增加就业	合理安排和充分利用劳动力资源，增加而不是减少就业机会
人类生态	工人一专多能，是产业过程自觉的设计者和调控者而不是机器的奴隶
网络经济	内外信息及技术网络的畅通性、灵敏性、前沿性和高覆盖度

二、生 态 农 业

生态农业(ecoagriculture)是当今世界人类在面临粮食缺乏挑战下提出的新观念，最早是由美国密苏里大学威廉(William)于 1971 年提出来的。生态农业是根据生态学的原理，运用生态工程和现代科学技术，建立和发展起来的一种多层次、多结构、多功能的集约经营管理的现代综合农业体系。简单地说，生态农业就是以生态学原理为指导，建立起来的一种新型现代农业生产方式。生态农业是世界农业发展的趋势，是我国 21 世纪农业发展的主导模式。其主要目的是：提高农产品的质和量，满足人们日益增长的需求；使生态环境得到改善，不因农业生产而破坏或恶化环境；增加农民收入。

1991 年联合国粮农组织提出可持续农业(sustainable agriculture)的概念：重视农业与环境的关系，通过管理和保护自然环境资源，调整技术和机构改革方向，以确保获得并持续满足几代人和今后世世代代人类的需求。可持续农业是现代农业和农业现代化的新发展，是一种比较先进、比较理想的农业模式，它不等同于国外的生态农业或有机农业，而是充分吸收了这类农业模式的合理内涵和有益实践。与可持续农业相比，中国生态农业集中体现了可持续发展的三个基本理论，是农业可持续发展的新模式，是一个完整、有效的可持续农业。

生态农业主要包括六个方面内容：① 建立综合农业体系，合理配置农林牧副渔各产业；② 提高资源利用率和生产率；③ 开发能源；④ 扩大肥源；⑤ 治理农村生态环境；⑥ 改善和提高农民生活和收入。我国的生态农业从理论到实践都取得了重大的成绩，并得到了国际社会的公认(详见第五章、第十一章)。

三、生态工业

20 世纪 50~60 年代以来，随着现代工业的高速发展，对环境的破坏越来越严重，阻碍了经济的可持续发展。人们迫切要求采用一种新的经济与生态协调的工业生产形式，来替代原来经济与生态不协调的生产形式。1989 年 Frosch 等发表的《可持续工业发展战略》，提出“工业可以运用新的生产方式，对环境的影响将大为减少”的观点，由此推出了生态工业的概念。所谓生态工业是指依据经济生态学原理，运用各种先进的科学技术，建立起来的对自然资源充分合理利用和对生态环境无污染或少污染的一种现代工业生产形式。简单地说，就是能够实现社会经济可持续发展的工业。生态工业是生态时代经济发展的一个重要方面，它代表着 21 世纪工业经济发展的方向，也代表着我国工业发展的目标与重点。

生态工业是模拟生态系统而建立的生产体系，是清洁生产过程，它的主要内容有：① 闭路循环的生产工艺；② “废料”资源化，重复利用；③ 污染实现零排放；④ 产品与服务的非物质化；⑤ 能源脱碳化。发展生态工业，实行清洁生产，是未来工业发展的必然方向，也是可持续发展战略的必然要求(详见第六章)。

四、生态旅游业

(一) 生态旅游业的概念

生态旅游业是以生态旅游资源为凭借，以旅游设施为基础，为生态旅游者的生态旅游活动创造便利条件并提供其所需商品和服务的综合性产业。从定义不难看出，生态旅游资源、旅游设施和旅游服务是生态旅游经营管理的三大构成要素。生态旅游资源的开发利用为满足生态旅游者的需求提供了可能，是生态旅游业生存和发展的凭借和依据，而旅游服务体系是旅游经营者借助旅游设施和一定手段向生态旅游者提供的活劳动，为利用和发挥生态旅游资源的效用创造了必要的条件，并通过一定的旅游经济实体和生态旅游政策的实施，为生态旅游活动提供服务而实现其旅游、保护、扶贫及环境教

育四大功能。

(二) 生态旅游业的发展趋势与前景

1. 客源市场明显拓宽，发展前景广阔

随着环境与发展问题的尖锐化，各国政府不同程度地加大了生态环境保护宣传、教育力度，人们的生态环境保护意识逐渐增强，“崇尚自然、返朴归真”成为一种新的旅游时尚，这为生态旅游业的客源市场营造了一个良好的社会氛围，加之生态旅游的参与性强，符合游客体验生活、丰富人生阅历和实现自我价值的心理需求，因而对游客的吸引力极大，使生态旅游者的数量在持续增加。生态旅游业的发展潜力巨大，前景广阔。

2. 在旅游业体系中的地位越来越重要

生态旅游最初是作为专项旅游产品出现在经济比较发达的国家，随着其所倡导的旅游开发与环境保护有机结合观念逐步深入人心，生态旅游的范畴已从自然生态景观延伸到人与自然和谐的人文生态景观，生态旅游一跃成为深受大众欢迎的旅游新时尚。无论其游客数量，还是旅游收入都在世界旅游业体系中占据越来越重要的地位。

3. 生态旅游产业将进一步完善

由于生态旅游业的迅猛发展，与之有关的吃、住、行、游、娱、购等服务设施将进一步完善，生态旅游导游专职人员增多，旅游服务与景点建设和管理将更符合生态环境保护要求，生态旅游纪念品将为越来越多的游客所喜爱与选购。

4. 生态旅游产品将更加注重个性化与多样化

随着生态旅游者消费品位和欣赏水平的提升，对生态旅游产品的特色和种类有了更高的要求，因此，应深入发掘生态旅游资源内涵，在主题策划、线路组合、宣传促销等方面做好工作，推动生态旅游产品步入投入少、产出快、加工深、收益高的经营方式， 推动生态旅游产业的可持续发展。

五、生态建筑产业

生态建筑产业是指按生态规律要求进行设计和建设的新型建筑产业。随着城市化进程的加快，21 世纪将有越来越多的人居住在城市，而城市人的大部分时间又工作和生活在室内。城市生态化、建筑生态化和住宅生态化，是 21 世纪生态文明的一个重要象征。发展生态产业，应重视培育生态建筑产业，使其成为生态产业的一个新增长点。

近年来随着人们环保意识和绿色消费意识的增强，为生态建筑产业的发展提供了一个新的发展机遇。目前，绿色建材、智能建材、抗菌面砖、卫生陶瓷、抗菌涂料和生态建筑等一大批生态建材产品相继问世，这些产品备受广大消费者的青睐。如 2000 年悉尼奥运会的建筑物就是按生态化要求设计的生态建筑，其取暖、照明来自太阳能，建筑

物使用的木材是得到认证的可再生林业生产的木材，有毒塑料的使用比正常建筑的使用量减少 80%，涂料是有害化学气体少的环保涂料等，这无疑使人们大开眼界，为生态建筑业发展作了一次空前的世界性展示宣传。展望未来，生态建筑产业的发展前景广阔。

六、环境保护产业

环保产业是以防止环境污染，改善生态环境为主要目的，从事产品生产、技术开发、资源利用、技术咨询服务、商业流通活动的总称，是防止污染、保护和改善生态环境的物质基础。环保产业作为跨部门、跨行业的综合性产业，包括的领域非常广泛，比如环境污染治理、环境工程建设、生态保护、水土流失防治、植被建设、环保技术转让、环保产品开发、环保咨询等，具有十分广阔的发展前景，有 21 世纪的“朝阳产业”之誉。

近年来环保产业已在美国、德国、日本等发达国家迅速崛起，成为这些国家的主导产业之一。我国环保产业起步较晚，在 20 世纪 80 年代末才开始有“环保产业”这一提法。1996 年底环保产业被列为国家计划，为环保产业的发展提供了广阔的发展空间，使其有望成为我国新的经济增长点。但目前我国环保产业的发展范围较窄，主要以环保机械为主，产业总体水平还比较落后，亟待进行扶持和加强。一要加强环保工程与项目建设，实现集约化治理污染。二要强化环保产业的企业化管理，提高环保设施的运行效率。三要积极培育环保市场，规范市场行为，提高环保投资的效率。四要大力培养环保人才，提高环保产业的科技含量。五要推行环保产业的社会化服务，提高环境保护的服务质量和水平。通过这些途径，推动环保产业向更高层次和更广泛领域发展，并带动产业结构的调整，形成资源节约型和清洁型的产业结构。

第五节　经济生态价值评估技术

一、能值分析法

（一）能值和能值分析的概念

能值 (emergy)是由美国著名生态学家 Odum 提出的新概念和标准。他将能值定义为一种流动或贮存的能量中所包含的另一类别能量的数量。任何形式的能量均源于太阳能，故常以太阳能值(solar emergy)为基准来衡量各种能量的能值，单位为太阳能焦耳(solar emjoules，即 sej)。以能值为基准，可以衡量和比较生态系统中不同等级能量的真实价值与贡献。

能值分析(emergy analysis)是以能值为基准，把生态系统或经济生态系统中不同种类、不可比较的能量转化为同一标准来衡量和分析，从中评价其在系统中的作用和地位；综合分析系统中各种生态流(能物流、货币流、人口流和信息流)，得出一系列能值综合指标(emergy indices)，定量分析系统的结构功能特征与经济生态效益。能值分析的

基本概念和指标见表 17-3。

表 17-3　能值分析的基本概念和指标

术语	定　　义
有效能	具有做功能力的潜能，其数量在做功过程中减少(单位：joules，kilocalories，BTUs 等)
能值	产品形成所需直接和间接投人应用的一种有效能总量(单位：emjoules)
太阳能	产品形成所需直接和间接应用的太阳能总量(单位：太阳能焦耳 sej)
太阳能值转换率	单位能量(物质)所具有的太阳能值(单位：sej/J 或 sej/g)
能值功率	单位时间内的能值流量(单位：sej/time)
能值/货币比率	单位货币相当的货币量；由一个国家或地区年能值利用总量除以当年国民生产总值(GNP)而得(单位：sej/$)
能值-货币价值	能值相当的市场货币价值，即以能值来衡量财富的价值或称宏观经济价值
净能值产出率	能值产出除以能值投人，作为对经济系统的贡献指标
能值投资率	某一国家或地区从环境资源中投人的能值之比

(二) 能值分析基本方法

1. 能值分析的基本步骤

能值分析方法，从研究对象看，有大尺度的国家或地区经济生态系统的能值分析，资源与经济的能值分析，城市或农业生态系统能值分析，以及小尺度的具体生产系统(比如农作物、工业品生产)能值分析等。从分析手段与步骤看，包括能量系统图(能量系统模型图和能值综合图)的绘制、各种能值分析表的制定、能物流量计算与能值计算评价、能值转换率和各种能值指标的计算分析、系统模拟等(Odum　1996)。能值分析的基本步骤为：

1) 资料收集。收集与研究对象相关的自然环境、地理和社会经济等各种资料数据，整理分类及存机处理。

2) 能量系统图的绘制。应用 Odum 的“能量系统语言”图例，绘制能量系统图，以组织收集的资料，形成包括系统主要组分及相互关系的系统图解。

3) 编制各种能值分析表。计算系统的主要能量流、物质流和经济流；根据各种资源的相应能值转换率，将不同度量单位(J、g 或$)的生态流或经济流转换为能值单位(sej)；编制能值分析评价表，评价它们在系统中的地位和贡献。

4) 构建系统的能值综合结构图。构建体现系统资源能值基础的能值综合结构图，对总系统和各子系统生态流进行集结和综合。

5) 建立能值指标体系。由能值分析表及系统能值综合结构图，进一步建立和计算出一系列反映经济与生态效率的能值指标体系。比如经济生态系统的能值指标包括：

① 能值转换率(emergy transformation ratio)，即单位能量(J 或 g)所具有的能值。实际应用的是太阳能值转换率，即由单位能量或物质相当于多少太阳能焦耳的能值转换而来。比如形成 1J 木材的能量需要 34 900 太阳能焦耳转化而来，则木材的能值转换率就是 34 900/sej。

能值转换率是衡量不同类别能量的能质(energy quality)和能级(energy hierarchy)的尺度，与系统的能量等级密切相关。通常，生态系统或经济生态系统的能流，从量多而能质低的等级(比如太阳能、风能等)向量少而能质高的等级(比如电能、高科技等)流动和转化；能值转化率随着能量等级的提高而增加，大量低能质的能量经传递、转化而成为具有高能质、高等级的能量。能量系统中较高等级者具有较大的能值转化率，需要较多低能质的能量来维持，具有较高的能质和较强的控制能力，在系统中扮演中心功能作用。复杂的生命、人类劳动、高科技等均属高能质、高转换率的能量。某种能量的能值转换率越高，表明该能量的能质和能级越高。能值的转换公式为

太阳能值(sej)= 所测算的原始数据(J)×太阳能转换率(sej/J)

② 能值投资比例(emergy investment ratio)。为衡量一个系统对经济投入依赖程度的重要指标，其计算公式为：

能值投资比例 = 经济投入的能值/环境提供的能值

一个系统的能值投资比率越低，说明该系统对经济系统的需求越小，而更多地依赖环境，环境对其影响也就越大。

③ 净能值产出率(net emergy yield ratio)。为系统中的能值产出与反馈的能值之比，其中反馈的能值来自于人类经济体系。净能值产出率是评价基本能源利用的指标，它说明经济生产利用能源的效率，表示经济活动的竞争能力。净能值产出率越高，说明经济效益越高，该系统也就越具有竞争力。

④ 能值/货币比率(emergy/dollar ratio)。单位货币相当的能量，即能值与货币的比率。它等于一个国家或地区年能值利用总量除以当年国民生产总值(GNP)。

一个国家全年利用的能值总量包括可更新资源(太阳能、雨水等)和不可更新资源(煤、石油等)及输入商品物资等。发展中国家具有较高的能值/货币比率，因为这些国家基本上是直接使用本国的资源，没有或很少用货币购买资源产品，同时其 GNP 较低，经济领域的货币较少。

通过能值/货币比率，可计算出系统中的经济投入和产出与能值的换算关系，计算公式为

系统中的能值(sej) = 系统中投入或产出的货币量($)/能值货币比率(sej/$)

⑤ 能值-货币价值(emdolar value)。能值相当的市场货币价值，即以能值来衡量财富的价值或称宏观经济价值(macroeconomic value)。也即输入经济系统的某种能值对经济系统的贡献，折算成货币，相当于多少币值。所得的币值，并非市场可流通的货币价值，只是表明该价值从宏观上看“相当于”多少币值。在实践中，计算宏观经济价值可用一个国家或地区的 GNP 除以货币能值比率。

6) 系统模拟。可采用能量系统动态模型进行模拟。

7) 系统的发展评价和策略分析。通过能值指标比较分析，系统结构与功能的能值评价和模拟，为制定正确可行的系统管理措施和经济发展策略提供科学依据，指导经济生态系统良性循环和可持续发展。

2. 生态流的能值综合分析

能值理论和分析方法为各种生态系统的定量分析提供了共同的度量标准，开拓了生

态流流量综合分析研究的途径。

以能值为量纲，可把系统的各种能量与物质转换成同一标准能值加以分析；货币与能值的数量关系，通过能值/货币比率来表示和反映；人均能值量(sej/人)则表示人口与能值的关系，并反映一个国家或地区人均拥有的能值财富，它是衡量人们生活水准的指标；信息、人类劳务和文化教育等，都可以用能值来分析，评价其价值。总之，以能值为基准，可对系统的各种生态流进行能值综合分析和评价，并计算出一系列反映效率的能值综合指标体系。

二、人力资本法

(一) 传统人力资本法

人力资本法(human capital approach)，也称工资损失法，它是通过市场价格和工资多少来确定个人对社会的潜在贡献，并以此来估算环境变化对人体健康影响的损益。

人力资本法的计算公式为

$$V=\sum_{t=T}^{\infty}Y_t P_T^t (1+r)^{-(t-T)}$$

式中：V 为年龄为 t 的人的未来总收入的现值；Y_t 为预计个人在第 t 年内所获得的总收入或增加的价值，扣除由他所拥有的任何非人力资本的收入的余额；P_T^t 为个人现在或第 T 年活到第 t 年的几率。

(二) 潜在寿命损失年法

潜在寿命损失年(YPLL)是流行病学中用于衡量疾病负担的一个指标，它是指死亡时的实际年龄与期望寿命年龄之差值，其计算公式为

$$\text{YPLL}=\text{EY}-\text{DY}$$

式中：EY 为期望寿命年龄；DY 为死亡时的实际年龄。

一般地，根据全国疾病监测系统的监测统计资料，可以计算出分死因的 YPLL 总值和每例死亡的平均 YPLL_a 值。由此可以计算出环境污染对健康损害的损失价值，其计算公式为

$$Y=Y_1+Y_2$$

$$Y_1=M_1(\text{YPLL}_a)P_1$$

$$M_1=NR_1A_1$$

$$Y_2=M_2TP_2$$

$$M_2=NR_2A_2$$

式中：Y 为环境污染造成的健康损失价值；Y_1 为因污染导致过早死亡的健康损失价值；

Y_2 为因污染导致发病增加的健康损失价值；M_1 为因污染导致过早死亡人数；M_2 为因污染而增加的发病人数；N 为所研究地区人口总数；R_1 为所研究地区总死亡率；R_2 为所研究地区总发病率；A_1 为死亡原因中归因于污染的系数；A_2 为发病原因中归因于污染的系数；P_1 为社会人均年工资额；P_2 为每例患者每天平均工资、医疗费和陪护费之和；T 为每例患者平均误工天数；$YPLL_a$ 为每例死亡者的平均潜在寿命损失年。

三、旅行费用法

旅行费用法(travel cost method)起源于如何评价消费者从所利用的环境中得到的效益。它是通过交通费和门票费(有时含有时间成本)等旅行费用资料确定某环境服务的消费剩余，并以此来估算该环境服务的价值。环境服务同一般的商品不同，它没有明确的价值。消费者在进行环境服务消费时，往往是不需要花钱的，或者只支付少量的入场费，而仅凭入场费很难反映出环境服务的价值。后来，有些研究者发现，尽管环境服务接近于免费供应，但是在进行消费时仍然要付出代价。这主要表现在消费环境服务时，要花往返交通费、时间费用及其他有关费用。因此，可以通过综合考虑这些费用的方法来确立环境服务的价值。

旅行费用法是通过旅行费用建立描述无价格环境服务的需求曲线(严格地说，是一种“全经验”曲线)，进而求出环境服务价值的方法。它自 20 世纪 60 年代提出以来，研究方法日趋完善，现已发展出三个模型，即分区模型、个体模型和随机效用模型。

(一) 分 区 模 型

分区模型是由 Clawson 和 Knetsch 设计的，它是一种最原始的应用较广的基础模型。通常说的旅行费用法就单指这种模型。该模型设计时依据了以下几个条件：一是所有旅行者使用环境服务获得的总效益没有差异，且总效益等于边际旅游者的旅行费用。二是边际旅行者的消费者剩余为零。三是所有人的需求曲线具有相同的斜率，即所有的人，不论距离环境位置多远，在给定的费用条件进行环境服务消费的数量是相同的。四是旅行费用是一种可靠的替代价格。

旅行费用法在实际应用时，分为以下几个步骤：

1) 划区。以环境所在地为中心，将其周围地区划分为距离不等的同心圆区。距离不同，旅行费用不同，距离越远，旅行费用就越高。

2) 进行游客调查。以此确定消费者的出发地、旅行费用、旅行率和其他各种社会经济特征。

3) 回归分析。以旅游率为因变量，以旅游费用和其他各种社会因素为自变量进行回归，确定方程，得到“全经验”的需求曲线。其具体数学关系式为

$$Q_i = f(\mathrm{TC},\ X_1,\ X_2,\ \cdots,\ X_n)$$

式中：Q_i 为旅游率，即所考虑的各地区范围内的居民到该环境旅游的人数占其总人数的比率；TC 为旅行费用；X_1，X_2，…，X_n：包括收入、教育水平和其他有关的一系列社

会经济变量。

4) 积分求积。依据上述所得的“全经验”需求曲线，采用积分法、梯形面积加和法等适当方式计算环境服务的价值。

(二) 个 体 模 型

旅行费用法个体模型(individual model)是对分区模型进行修正得到的，1973 年 Brown 等最早使用该模型。其具体形式为

$$V=f(\mathrm{TC}, X_1, X_2, X_3, X_4)$$

式中：V 为某旅游者每年到一个旅游地的次数；X_1 为收入水平；X_2 为平均每次在该环境现场停留的时间；X_3 为是否具有可替代的旅游地，没有为 0，有为 1；X_4 为旅游者其他变量；TC 为平均每次到该环境旅游的费用。

个体模型较适用于以当地居民为主要游客的旅游地的环境服务价值评估。

(三) 随机效用模型

在同一区域内，不同的旅游场所具有一定程度的可替代性，比如在某地存在旅游场所 A 与 B，对于旅游者而言，是到 A 或到 B 旅游存在着一定的随机性，特别是对 A、B 两处的情况不甚了解时更是如此。因此，若不考虑替代旅游场所，将高估环境服务的价值。这是分区模型和个体模型难以解决的。为此，Freeman 于 1993 年提出了随机效用模型(random utility model)，它是针对旅游者面临许多可替代的旅游地，做出旅游决定的选择行为模型。具体形式为

$$U_{ji}=f(M_i-C_{ji}, Q_j, S_i)+E_{ji}$$

式中：U_{ji} 为旅游者 i 选择旅游地 j 时的效用；M_i 为旅游者 i 的收入；C_{ji} 为旅游者 i 到旅游地 j 时的旅行费用；Q_j 为环境服务的质量和特点；S_i 为旅游者 i 的其他社会经济变量；E_{ji} 为不可观察效用，假设为随机的。

随机效用模型不仅可以评估旅游地的环境价值，而且可以更好地评估一个旅游地环境质量变化的价值和某一特色环境的景观价值。

旅行费用法在应用时要注意两点：一是旅行费用法将效益等同于消费者剩余。该法用旅游者的消费者剩余代替环境服务的价值，导致其结果难以与通过其他方法得到的货币度量结果相比，这是由于两者对待消费者剩余的态度不同。货币度量法常常忽略消费者剩余，如要进行比较，需进行必要的调整。二是效益是现有收入的分配函数。在该理论中，效益是通过那些能够支付得起旅游费用的人的效益来体现的，忽略了收入低暂时不能去旅游的人的效益。对于收入分配差距悬殊的地方，这一点是不能忽视的，否则所得结论将与实际情况偏差较大。

四、费用支出法

生态环境的变化，最终会影响到费用(一般指环境保护费用)的改变。这是因为人类为了更好地生存，必然要对生态环境的恶化采取一定的措施。比如为避免噪音的干扰，将窗户加上隔音器，或举家迁往更安静的地方等，这些行动都要花费一定的费用。因此， 可通过计算这些费用的变化，间接地推测出生态环境的价值。根据实际费用情况的不同， 可将费用分析法分为三种。

(一) 防护费用法

防护费用是指人们为了消除或减少生态环境恶化的影响而愿意承担的费用。比如在水环境不断恶化的情况下，人们为得到安全卫生的饮用水，购买、安装净水设备；为防止洪涝灾害，修建堤坝等。由于增加这些防护设施的费用，可以减少甚至杜绝生态环境恶化及其带来的消极影响，产生相应的生态效益。也即避免的损失，就是相当于得到的潜在效益。虽然这种替代还存在一些缺点，但防护费用法对生态环境问题的决策是非常有益的。因为有些保护和改善生态环境的措施的效益，或生态环境的价值的评估是非常困难的。运用这种方法，就可将不可估算的问题转化为可估算的问题，应该说这是一种观念与方法的创新。

(二) 恢复费用法

生态环境的恶化会给人们的生产、生活和健康造成损害，而减缓或消除这种损害的最直接的办法，就是采取措施将恶化的生态环境恢复到原来的状态。理论上，可以用恢复措施所需的费用来估算生态环境质量的价值。比如一个水体(河流、湖泊、水库等)受到污染，造成很多损失。那么，采取治理措施，使受污染的水体基本恢复到原来未污染时的状态，则该治理措施所需的全部费用，就是该水体的环境质量价值(或环境容量价值)的损失。

(三) 影子工程法

影子工程法是恢复费用法的一种特殊形式。由于环境的生态价值难以直接估算，所以可借助于能够提供类似功能的替代工程或所谓的影子工程的价值来替代该环境的生态价值。比如森林具有涵养水源的生态功能，这种功能很难直接进行价值量化，但借助影子工程法，修建贮存与森林涵养水源量相同水量的水库，则该水库的价值，即造价除以寿命期(折旧费)，加上运行费用，再资本化(除以贴现率)后的数值，就可替代该森林涵养水源的生态功能的价值。

五、实验评价法

实验评价法(contingent valuation method)又称调查评价法或意愿评估法，它是通过对消费者的直接调查，了解消费者的支付意愿，或者他们对商品或服务数量选择的愿望。自 20 世纪 80 年代以来，该法得到了迅速发展，现已用于估算公共资源或不能分割的物品(比如水、空气等)和具有美学、文化、历史、生态或者罕见的享受性资源，以及没有市场价格的其他商品和服务的价值。在西方国家，该法得到了广泛的应用，标志着它的日趋成熟。

实验评价法的基本理论依据是效用价值理论和消费者剩余理论。进一步说，它是依据个人需求曲线理论和消费者剩余，补偿变差及等量变差两种希克斯计量方法，运用消费者的支付意愿或接受赔偿的愿望来度量生态系统服务的价值。实验评价法可分为投标博弈法、比较博弈法、无费用选择法、优先评价法和德尔菲法。

(一) 投标博弈法

投标博弈法(bidding games approach)是通过对个人的访问，反复应用投标过程，求得个人愿意支付的最大金额或同意接受赔偿的最小金额，作为评估环境损益的度量。这种方法首先需要向被访问者认真详细地介绍环境服务的特征，包括数量、质量、时间、使用年限及使用权限等，然后给被访问者一个起点值 X，询问他是否愿意为此而支付。如果回答是肯定的，再提高投标，如此反复，直到得到否定回答时为止。或访问者先给出一个高点值，然后逐步降低投标，直到得到回答愿意时为止。用这种方法，一般可以确定较精确的支付意愿。对被访问者可能面临的损失，也可采用类似的方法确定。

(二) 比较博弈法

比较博弈法(trade-off games approach)要求个人在多种支出中做出偏好选择。多种支出最简单的情况是先提出两种选择方案：一是有一定数量的环境服务，从没有货币支出到由个人支付一定的金额(基本支出)；二是由个人支付多于基本支出的金额，并同时改变提供服务的数量(选择支出)。然后，询问被访问者，愿意选择哪项支出，并有计划地改变选择支出中设定的金额，直到两种支出的选择相同为止。选择支出最后确定的金额，就是个人为增加环境服务数量而做出的货币权衡，即个人对这种增加的环境服务的支付意愿。

(三) 无费用选择法

无费用选择法(costless choice approach)首先用直接询问法来确定个人在各种不同数量的商品或服务之间的选择，然后用选择提供的定量数据，推断出被访问者的支付意愿。一般情况下，选择是在多方案中进行的，没有费用的参与。其中，一个方案就是待

估的环境服务，其他方案则是一笔钱或能够用价值度量的商品。如果选择了环境服务，则意味着环境服务价值的下限，就是放弃的那笔钱。

(四) 优先评价法

优先评价法是由 Hoin Ville 和 Berthoud 提出的，它的原理就是个人效用在预算约束条件下的最大化。其基本方法是力图模拟完全竞争市场的机制，然后找到对无价的环境服务的支付意愿，即环境服务的价值及其具体表现形式。该法与无费用选择法相似。

(五) 德 尔 菲 法

德尔菲法(Delphi technique)是各自单独地反复向专家咨询，以确定环境服务的价值的方法。经过第一轮咨询后，用图表形式将所得初值列出，并对其中偏离的数据请有关专家做出解释，然后再反馈并重新评定所得的新值。这样通过几次校正，就可以取得统一的估算值。它的特点是采用间接的通讯方式进行，以避免专家之间相互影响。当然，其结果的准确性与专家的水平有关。

实验评价法的显著特点是，它特别适宜于对非使用价值(存在价值、遗赠价值和选择价值)占较大比重的独特景观和文物古迹价值等环境服务价值的评估。但该法也有两点不足：一是假设性，即它确定个人对环境服务的支付意愿是以假设数据为基础，而不是依据数理方法进行估算。二是可能存在多种偏差，比如信息偏差，即由提供给个人的信息失真而造成等。因此，在应用该方法时，应采取审慎的态度和方法，以尽量减少误差。

六、资产价值法

资产价值法是利用生态环境变化对某些产品或生产要素价格的影响来评估生态环境的价值。自 20 世纪 70 年代以来，该法得到了广泛的应用，特别是常用于评估环境污染对房地产价值造成的损失，以及环境质量与工资之关系的研究。其计算公式为

$$a_n = \frac{\partial P}{\partial Q_n}$$

式中：a_n 为生态环境质量边际变化的价值；P 为房地产价格；Q_n 为生态环境变量。

七、市场价值法

市场价值法(market value approach)也称生产率法，基本原理是将生态环境作为生产中的一个要素，生态环境质量的变化将导致生产率和生产成本的变化，进而影响价格和产出水平的变化，或者将导致产量或预期收益的损失，比如大气污染将导致农作物减产，影响农产品的价格等。因此，通过这种变化可求出生态环境质量的价值。市场价值

法有两种计算方法：

(一) 生产要素不变，产量增加不影响市场格局

如果生态环境质量的变化不会引起生产要素的变化，而且产量的变化也不会引起供需矛盾的整体结构改变。此时，生态环境的价值计算公式为

$$V = q(P - C_v)(\otimes Q) - C$$

式中：V 为生态环境价值；P 为产品的价格；C_v 为单位产品的可变成本；q 为产量 Q 的每一单位，通常取值为 1；$\otimes Q$ 为产量变化量。

(二) 要素价格变化

如果生态环境质量的变化导致产量 Q 的变化，并引起产品和生产要素价格的变化，则生态环境的价值计算公式为

$$V = \frac{\Delta Q(P_1 + P_2)}{2}$$

式中：V 为生态环境价值；$\otimes Q$ 为产量变化量；P_1 为产量变化前的价格；P_2 为产量变化后的价格。

八、机会成本法

机会成本法(opportunity-cost approach)中的机会成本是指做出某一决策而不做出另一种决策时所放弃的利益。机会成本是一种非货币成本，常用来衡量决策的后果。机会成本法是费用-效益分析法的重要组成部分，它常被用于某些资源应用的社会净效益不能直接估算的场合，是一种非常实用的技术。将生态环境消费视为一种机会成本，利用该法可估算出生态环境的价值，从而为决策者提供科学依据，以便更好地配置生态环境资源。

九、生态足迹法

生态足迹(ecological footprint)的概念和方法是由 Rees 和 Wackernagel 在 1992 年提出的。他们将生态足迹定义为在现有技术条件下，按空间面积计量的一个特定地区的经济和人口的物质、能源消费和废弃物处理所要求的土地和水等自然资本的数量。其计算公式为

$$\mathrm{EF} = N\mathrm{ef}$$

$$\mathrm{ef} = \sum(\mathrm{aa}_i) = \sum(c_i / p_i)$$

式中：EF 为总的生态足迹；N 为人口数；ef 为人均生态足迹；i 为交换商品和投入的类

型；aa_i为人均 i 种交易商品折算的生产型土地商品；c_i为 i 种商品的人均消费量；p_i为 i 种交易商品的平均生产能力。

十、生态服务法

生态系统服务是指生态系统及其所属物种支撑和维持人类生存的条件和过程。对生态系统服务的评价方法有两种：

（一）物质量评价法

该法主要是从物质量的角度对生态系统提供的服务进行整体评价。如果该生态系统提供服务的物质量不随时间的推移而减少，则认为该生态系统是处于比较理想的状态。设 t 为时间，$\otimes t$ 为时间增量，生态系统在 t 时刻提供的 n 种服务分别为 $Q_1(t)$，$Q_2(t)$，…，$Q_n(t)=[Q_1(t)$，$Q_2(t)$，…，$Q_n(t)]$为生态系统在 t 时刻提供的服务向量。其数学表达式为：

$$Q(t+\otimes t)\varepsilon Q(t) \qquad (\otimes t\ \varepsilon\ 0)$$

此时，该生态系统处于比较理想的状态。

（二）价值量评价法

价值量评价法主要是从价值量的角度对生态系统提供的服务进行评价。如果生态系统提供服务的价值量不随时间的推移而减少，则认为该生态系统是处于比较理想的状态。设 $P(t)=[P_1(t)$，$P_2(t)$，…，$P_n(t)]$为生态系统 t 时刻提供的服务向量。其中 $P_i(t)$为第 i 种服务在 t 时刻的价格(i =1，2，…，n)，进一步设 $v(t)$为生态系统服务的价值量，即 $v(t)=Q(t)\times P'(t)$。其数学表达式为

$$v(t+\Delta t)\geqslant v(t) \qquad (\Delta t \geqslant 0)$$

此时，该生态系统处于比较理想的状态。

十一、成本效益分析

成本-效益分析是一种经济生态核算方法，其核心是机会成本和影子工程价格的比较分析，该法多用于生态决策分析。成本-效益分析是从综合评价的角度，把各种现实的、长远的、潜在损失(机会成本)以及短线要素的边际价值(影子工程的价值)进行估算，并对拟进行的规划项目开发期内总收益与边际收益进行对比分析和预测，以确定一个适当的生产规模，要素替代量。比如采矿导致森林损失的机会成本，随采矿生产规模的扩大而增加，因此，机会成本(PC)曲线会不断上升。同时，采矿生产的净边际收益(MNB)会随开发难度的加大而递减。考虑到森林的自我更新量(D)，假设其更新率是恒定的，则更新 量为一常数。如果这一更新量在采矿前未被作为木材而伐掉，则其曲线

关系如图 17-5 所示。

在图 17-5 中，如果采矿生产的净边际效益曲线 MNB 与机会成本曲线 PC 相交于 A 点下方机会成本曲线的任意一点，比如 A'，采矿的生产规模所引起森林机会成本损失，都在可更新量曲线 D 所允许的范围内，因此 X_1 生产量引起森林破坏的机会成本可被更新价值量抵消。同理 OX_0 个单位生产量是临界点，而 A'' 对应的 $X_0–X_2$ 单位生产量引起的 $Y_0–Y_2$ 单位价值量是净机会成本的增加值，是不能被抵消的。因此，从成本–效益核算结果看，采矿生产扰动的森林损失和其收益决定的生产规模是 OX_0 个单位生产规模。反之，为保存森林的一个价值量，而放弃了 $X_0–X_2$ 个单位的矿产品收益，$Y_0–Y_2$ 则是森林生产的机会成本。成本-效益分析就是在两个机会成本中比较，以求得最佳生产结合。总之，经济生态成本-效益分析的核心是机会成本和影子价格的比较分析。

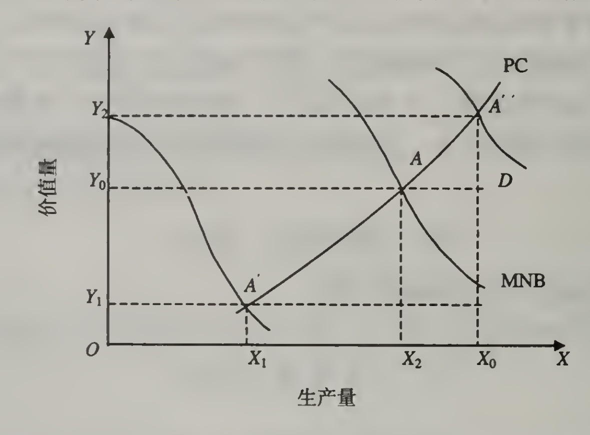


图 17-5　成本-效益分析中的机会成本与净边际收益的关系

第六节　经济生态系统可持续发展

一、经济生态系统可持续发展的指标体系

（一）经济生态系统可持续发展指标的类型

由于经济生态系统可持续发展过程是一个涉及社会、经济、自然要素相互作用，协同耦合的过程，加之非线性开放、动态等特征，因此其可持续发展指标体系的建立十分困难。依据不同的标准，可把经济生态系统可持续发展的指标体系分为描述性指标和评价性指标两大类。其中，描述性指标用来表示社会、经济、资源、环境四大系统任意时刻状态与发展趋势，比如经济水平、人口控制水平、资源利用率、生态环境质量等；评估性指标是社会、经济、资源、环境四大系统相互联系与协调程度的指标，即经济与生态系统之间协调发展程度。

(二) 经济生态系统可持续发展指标体系的制定原则

1) 层次性原则。经济生态系统是一个复杂的巨系统，它可分为若干子系统。因此，描述和评估经济生态系统可持续发展的程度与状况，应从不同层次上采取不同的指标，即在不同层次上应有不同的指标体系，以利于对其进行管理和宏观调控。

2) 全面性与简洁性原则。指标体系的覆盖面要广，能全面地、综合地反映经济生态系统的各种要素之间的关系。同时指标体系的内容应简明扼要，具有代表性，能准确、清楚地反映问题。

3) 相关与动态性原则。可持续发展的核心是实现人口、资源、环境和经济之间的协调发展。因此，各指标之间应有密切的内在联系，能很好地评估经济生态系统可持续发展的程度。

4) 定性与定量相结合原则。经济生态系统可持续发展的指标体系应尽可能量化，但对于一些重要却难以量化的指标，也可用定量指标来描述。

5) 可行性与可操作性原则。构建经济生态系统可持续发展指标体系既要以理论分析为基础，又要考虑实际可操作性与现实数据资料的可行性。力求使所选指标含义清晰、科学，具有一定的可靠统计数据作基础。

(三) 经济生态系统可持续发展指标体系的构成

1. 描述性指标

经济生态系统可持续发展指标体系包括社会、经济、资源和环境四大指标体系，其中：

1) 社会发展指标。社会发展的目标是提高人口素质和生活质量以及社会文明。该指标主要是指以人为主体的指标，如表 17-4 所示。

表 17-4 主要社会发展指标

社会发展指标	单位	特征
总人口	人	反映国家或地区的人口总规模
人口增长率	%	反映国家或地区人口变动趋势
人口平均寿命	年	反映社会进步及人民物质文化生活水平
人口平均受教育程度	年	表示人口素质
每万人拥有医生数	人	反映社会发展与经济发展之间的关系
每万人拥有电话数	台	反映社会发展与经济发展之间的关系
人均收入与人均消费	元	反映人民物质生活水平
城市人口比重	%	反映社会发展与经济发展之间的关系
人均住房面积	m^2	反映人民物质生活水平
年人均生活用电量	kWh	反映人民物质生活水平与社会发展

2) 经济发展指标。经济发展的目标是为了发展生产，扩大生产规模，改善经济结构，提高劳动生产率。该指标是以生产为主体的指标，如表 17-5 所示。

表 17-5　主要经济发展指标

经济发展指标	单　位	特　征
GNP 及变化率	元、%	反映国家或地区的经济水平
人均 GNP 及变化率	元、%	反映国家或地区的富裕程度
三次产业结构比重	%	表示产业结构，说明国家或地区的发展阶段
三次产业就业结构比重	%	表示就业结构，说明国家或地区的发展阶段
单位产值能耗	(标煤)t/元	表示经济效益，反映经济活动中技术水平
单位产值水耗	m^3/元	表示经济效益，反映经济活动中技术水平
经济政策与环保政策		定性指标

3) 资源指标。资源是人类赖以生存和发展的物质基础，也是经济生态系统可持续发展必不可少的。资源指标主要包括土地、能源、水资源等指标，如表 17-6 所示。

4) 环境指标。环境的优劣是衡量可持续发展的重要标志，该指标如表 17-7 所示。

表 17-6　资源指标

资源指标	单位	特征
资源可开发储量	t、m^3	反映资源可利用存量
新增资源可开发储量	t、m^3	反映资源可利用存量的变化
资源开发利用程度	%	反映资源利用前景
人均资源占有量	t、m^3	反映国家或地区经济发展物质基础
资源进口量	t、m^3	反映国内资源供应不足

表 17-7　主要环境指标

环境指标	单　位	特　征
烟尘 SO_2、CO_2 排放量及变化率	t、%	反映环境状况及趋势
人均 SO_2、CO_2 排放量	t	反映环境质量及水平
工业废气排放量及变化率	t、%	反映环境状况及趋势
工业污水排放量及变化率	t、%	反映环境状况及趋势
城市噪音	dB	反映环境状况及趋势
饮水卫生程度	%	反映环境质量及水平
森林覆盖率	%	反映生态状况
水土流失面积及变化率	hm^2、%	反映生态恶化及趋势
沙化土地面积及变化率	hm^2、%	反映生态恶化及趋势
草原退化面积及变化率	hm^2、%	反映生态恶化及趋势

2. 评估性指标

评估性指标是评价可持续发展状态与程度的，它可反映四大系统(社会、经济、资

源、环境)描述性指标之间的关系及描述性指标的不同值与经济生态系统可持续发展的关系。通过事前评估，为加强经济生态系统管理与调控提供依据；通过事中、事后评估，可及时总结经验、发现问题与采取措施。评估性指标如表 17-8 所示。

表 17-8 评估性指标

评估性指标	单位	功能
人均 GNP	元	反映可持续发展实力
科技贡献率	%	反映可持续发展实力
科技人员比例	%	反映可持续发展实力
人均耕地面积	hm^2/人	反映可持续发展实力
就业率	%	反映可持续发展的协调程度
失业率	%	反映可持续发展的协调程度
通货膨胀率	%	反映可持续发展的协调程度
基尼系数	%	反映可持续发展的协调程度
资源保证率	%	表示资源可利用程度
资源破坏及退化程度	%	表示资源可利用程度
单位 GNP 废水排放	m^3/元	表示环境质量
单位 GNP 废气排放	t/元	表示环境质量
悬浮物年均浓度	mg/m^3	表示环境质量
废物处理率	%	表示环境质量

二、经济生态系统可持续发展模型

(一) 逻辑斯谛模型

经济生态系统发展过程的基本模型可用逻辑斯谛曲线及其方程式来模拟。在发展过程不受任何环境因子的限制时，其曲线如图 17-6 中的曲线 A 所示，其表达式为

$$dx/dt = rx$$

式中：r 为发展所需的增长率；x 为发展要素；dx/dt 为发展要素的增长率。

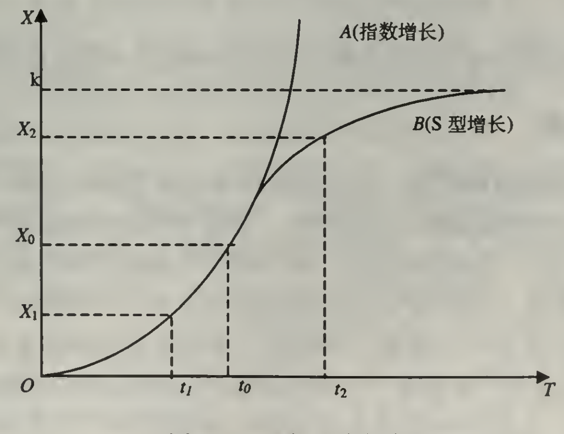


图 17-6 逻辑斯谛曲线

但在有限的社会、经济、技术和生态资源条件下，其发展程度总有一个周期内的阈值，其曲线如图 17-6 中的曲线 B 所示，其表达式为

$$\mathrm{d}x/\mathrm{d}t = rx(1 - x/k)$$

式中：k 为发展要素的阈值，也称最大环境容量；其余各符号含义同上。达到 k 这一发展要素阈值的过程曲线呈 S 型，称 S 型增长曲线或逻辑斯谛曲线。随着科学技术的进步，在发展的每一个周期内，发展水平都是在前一个发展水平基础上的升级，形成若干个逻辑斯谛曲线的组合，这就是经济生态系统可持续发展的逻辑斯谛模型(图 17-7)。

可见，为保证经济生态系统可持续发展，在系统发展过程中，人类对资源的开发利用、对污染物的排放，必须在系统承载力范围内，即不能超过最大环境容量。

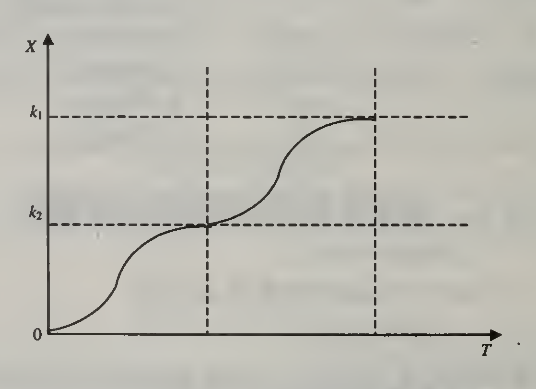


图 17-7　经济生态系统可持续发展模型

(二) 层次分析法模型

层次分析法(AHP)是目前常用的评估可持续发展能力与程度的主要方法之一。

1. AHP 法的主要步骤：

1) 构建层次分析法结构模型。分析系统中各因素之间的关系，建立系统的递阶层次结构，构建层次分析结构模型。在模型中，复杂系统被分解成若干组成因素，这些因素按其属性分成若干组，形成不同层次，同一层次的因素作为准则对下一层某些因素起支配作用，作为准则这一层元素又受上层元素的支配。一般分为 3 个层次，即最高层， 也称为目标层，只有一个因素。中间层，为实现目标所涉及的中间环节，也称准则层，可包括若干个层次。最低层，为实现目标可供选择的各种措施、决策方案等，也称措施层或方案层。在经济生态系统可持续发展研究中，最低层包括有关社会、经济、 环境、资源等因素组成的发展方案。

2) 构造判断矩阵。把同一层中各因素对上一层中某一准则的重要性进行两两比

较，构造判断矩阵。并列出矩阵式：

$$A=(b_{ij})n\times n \quad (i\neq j \quad i，j=1，2，\cdots，n)$$

式中：A 为判断矩阵；n：两两比较的因素数目；b_{ij} 为因素 U_i 比 U_j 相对于某一准则 C 重要性的比例标度，可按 1~9 比例标度对重要性程度赋值。

3) 计算相对权重。由判断矩阵计算被比较因素对某一准则的相对权重。n 个因素 U_1，U_2，…，U_n 对于准则 e 的判断矩阵 A，n 个因素对于准则 C 的相对权重 W_1，W_2，…，W_n。相对权重的向量形式为：

$$W=(W_1，W_2，\cdots，W_n)^T$$

用特征根法求解判断矩阵的最大特征根与相应的特征向量，经正规化后的特征向量即为相对权重向量。并对其进行一致性检验。

$$\lambda_{\max}=\sum_{i=1}^{n}\frac{(AW)_i}{n\boldsymbol{W}_i}$$

式中：$\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征根；$\boldsymbol{W}_i$ 为因素 i 的特征向量，即相对权重。

4) 排序。计算各层因素对系统目标的合成权重。同时可对各因素或准则对系统目标的实现程度的作用(相对权重)进行排序。

2. 应用 AHP 分析研究经济生态系统可持续发展的实现程度

1) 构建经济生态系统可持续发展层次分析模型。最高层，经济生态系统可持续发展总目标。中间层，在满足经济生态系统可持续发展的前提下，实现社会、经济、资源与环境目标。中间层有社会、经济、资源与环境 4 个准则。最低层，经济生态系统可持续发展的描述性与评估性指标，即系统可持续发展的主要因素，这些因素按其性质归属于社会、经济、资源与环境四大类，分别受中间层准则支配。在经济生态系统可持续发展层次分析结构模型(图 17-8)中，A 为最高层目标，即经济生态系统可持续发展目标。C 为中间层，即准则层。C_1 为经济准则，即实现经济发展目标；C_2 为社会准则，主要为人口目标；C_3 为资源准则，主要为资源利用目标；C_4 为环境准则，主要为环境质量目标。P 为最低层，即指标体系。P_E 为经济发展描述性指标，共有 7 个指标组成(表 17-5)，为 P_{E1}，P_{E2}，…，P_{E7}；P_S 为社会发展描述性指标，共有 10 个指标组成(表 17-4)，为 P_{S1}，P_{S2}，…，P_{S10}；P_R 为资源描述性指标，共有 5 个指标组成(表 17-6)，为 P_{R1}，P_{R2}，…，P_{R5}；P_P 为环境描述性指标，共有 10 个指标组成(表 17-7)，为 P_{P1}，P_{P2}，…，P_{P10}；P_W 经济生态系统的评估性指标，共有 14 个指标组成(表 17-8)，包括可持续发展实力、可持续发展协调度、资源可利用程度及环境质量等，分别用 P_{W1}，P_{W2}，P_{W3}，

P_{W4}表示。

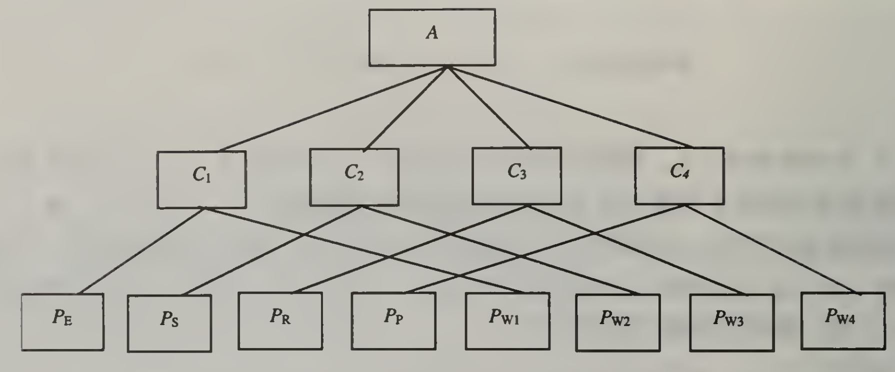


图 17-8　经济生态系统可持续发展层次分析结构示意图

2) 构造判断矩阵。分别构造判断矩阵 A-C、C-P(C_1-P_E，P_{W1}、C_2-P_S，P_{W2}、C_3-P_R，P_{W3}、C_4-P_P，P_{W4})。

3) 计算相对权重。计算四个准则因素 C_1、C_2、C_3、C_4 对经济生态系统可持续发展总目标的相对权重，得到准则层对目标 A 的重要性向量(相对权重)。同样，可计算出 P_EP_{W1} 对 C_1 的相对权重 P_{EW}，P_SP_{W2} 对 C_2 的相对权重 P_{SW}，P_RP_{W3} 对 C_3 的相对权重 P_{RW}，P_PP_{W4} 对 C_4 的相对权重 P_{PW}。

$$W_C=(W_{C1}，W_{C2}，W_{C3}，W_{C4})^T$$

4) 经济生态系统可持续发展目标实现程度的评估。通过矩阵乘法，依次求得各指标对准则、对总目标的实现程度。在评估中要先对各指标(包括描述性指标与评估性指标)实现程度进行评估，然后用 AHP 法对主要指标、对准则指标实现程度进行评估，最后对经济生态系统可持续发展总目标进行评估。比如四个准则层相对于总目标 A 的评估矩阵为

$$W_A=[W_{C1},W_{C2},W_{C3},W_{C4}]\begin{vmatrix}C_{EW}\\C_{SW}\\C_{RW}\\C_{PW}\end{vmatrix}$$

$$W_A=[A_E，A_S，A_R，A_P]$$

式中：A_E 为经济发展指标与可持续发展实力指标对总目标 A 的实现程度；A_S 为社会发展指标与可持续发展协调程度指标对总目标 A 的实现程度；A_R 为资源指标与资源可利用指标对总目标 A 的实现程度；A_P 为环境质量指标对总目标 A 的实现程度。

从计算结果数据可分析该系统各类指标对经济生态系统可持续发展总目标实现程

度，并从中发现存在问题及调控方向。

第七节　经济生态系统的管理

一、经济生态系统管理的概念与内容

（一）经济生态系统管理的概念

经济生态系统管理是指运用行政、法律、经济、科技、教育等手段，对经济生态系统进行的调控，使经济生态要素有序组合，达到系统的良性循环和稳定、协调发展。

大量事实表明，生态破坏和环境恶化是由于管理不善造成的。因此，为减缓生态破坏和环境污染恶化的趋势，确保经济生态系统的可持续发展，加强生态环境管理工作势在必行。

（二）经济生态系统管理的主要内容

1）重视整体性管理。整体性是经济生态系统的基本特征之一，在管理中要特别予以重视。经济生态系统有其自身的运动规律，切忌人为割裂这种规律。比如草原生态系统具有一定的承载力，在发展畜牧业生产时，不能只顾眼前经济利益，过度放牧，粗放经营，而应加强草原基本建设，科学养畜，促进草原生态系统的可持续发展。从经济生态系统的整体性出发，在系统管理中，一方面要搞好生态规划，协调生态环境保护与经济发展的关系。同时，要加强生态环境监督，维护和改善生态环境。

2）实行清洁生产。实行清洁生产包括采用清洁能源、生产过程无(或少)废物以及生产对环境无害的产品等内容，它对减轻环境污染，促进经济生态系统可持续发展具有重要作用。

3）废物资源化管理。从生态学的角度看，资源与废物之间，并没有绝对的区别，废物可以说是放错了地方的资源。只要有先进的技术，废物就可以再次得到回收利用。因此，应依靠科技，采取多种途径将废物进行资源化处理，变废为宝。比如，将有机物垃圾生产成复合肥、利用垃圾中可燃性物质燃烧产生热量，实现热电联供，建立垃圾资源化管理的运行机制， 科学管理，提高效率。

4）加强经济生态系统管理理论与方法研究。积极探索经济生态系统科学管理的理论与方法，建立科学的经济生态系统管理体系，强化系统管理，促进经济生态系统良性运行与可持续发展。

二、经济生态评价

（一）生态评价的概述

1. 生态评价的概念

生态评价也称生态环境评价，包括生态环境质量评价和生态影响评价。其目的是科学地评估人类活动对生态环境的影响，以便采取措施约束人们的行为，减少对生态环境的影响。

1）生态环境质量评价。生态环境质量评价是按照一定的评价标准和运用综合评价方法，对某一区域的生态环境质量进行评定和预测，为生态环境规划和生态环境建设提供依据。

2）生态环境影响评价。生态环境影响评价是对人类开发建设活动可能导致的生态环境影响进行分析和预测，并提出减少不利影响或改善生态环境质量的对策、措施，为有关决策部门提供科学依据。

2. 生态环境功能的价值计量

生态环境功能的价值可分为直接经济价值、间接环境价值、选择价值和存在价值。这些价值有的可直接计量，有的可间接或近似地计量，有的则完全无法计量或不可计量。

1）直接经济价值。生态环境功能可直接计量的是其生产生物资源的功能，因为这些资源可以直接在市场上进行交易，比如木材、药材、肉蛋奶类、鱼贝类等。生物资源是惟一可在国家收入账户中反映出来的价值，但单纯从市场交易额中并不能判别生物资源的全部价值。在实际计量某一区域的生物资源价值时，需要把全部收获的生物资源都计算在内，用一个假定的市场交易价值来计量它们。

2）间接价值。间接价值主要是指生态系统的间接环境功能价值。这种价值远高于其直接生产可消费生物资源的价值。比如森林的直接价值与其间接价值之比，美国为1∶9，芬兰、中国为1∶3等。

生态环境功能价值的计量，多是一种间接的不完全的估量方法(表 17-9)。在开发建设活动的生态环境影响评价和生态环境保护中，研究生态环境功能并努力将其定量化，计量其价值，是为了度量进行开发前后生态环境变化的量，从而明确开发建设者所应承担的环境责任，以便采取预防或保护性战略和措施。

3）选择价值。选择价值是一种未来价值或潜在价值，是难以计量的价值。生态环境的选择价值是随着科学技术和社会经济的发展而不断提高的，但这并不能代替或减少传统的资源利用方式和利用量。比如木材在古代只有薪炭、建材、家具等用途，现在则增加了造纸、木材化工等用途，其选择价值显著提高，虽然发展了钢材、塑料等很多代用品，但木材的需求量仍在不断地增加。可见，生态环境随着科学技术的提高，其选择价值必然日益提升，其保护和改善也就日益变得重要起来。

表 17-9　生态环境功能间接价值估量

生态环境功能	价值估量
光合作用生成有机质	全部生物物质生产量(或主要资源价值)
蓄水	蓄水量×水价
保护土壤、防止侵蚀	水库清淤费+土壤肥分流失损失
防风固沙、防止荒漠化	人工固沙费用
改善气候	营林费用+农业增产价值
吸尘滞尘	工业除尘费用
吸收有毒气体	工业处理污染物费用
减少噪音	按人工减噪或防护费用计算
吸收 CO_2 和制造 O_2	人工处理 CO_2 费用+O_2 制造费用
保护生物多样性	物种迁地保护费用
社会功能	按人工建造同样价值资源计算
防震减灾	按防震减灾费用+灾害损失费用
其他功能	按实际收益、损失或人工恢复费用估算

4) 存在价值。存在价值是一种几乎无法计量的价值，比如荒野地对于现代人类紧张所发挥的“解痉”作用。许多生态系统仅仅其存在，就能发挥作用。比如生态系统多样性造就的美丽景观和提供的娱乐、旅游、野趣等社会文化功能，就是由生态系统的存在产生的。

3. 生态环境影响评价的基本原则

生态环境影响评价是一个综合分析生态环境和开发建设活动可能特点及二者作用的过程，并依据国家政策和法规提出对受影响生态环境行使有效保护的途径和措施，依据生态学就生态环境保护基本原理进行生态系统的恢复与重建的设计。在进行生态环境影响评价时，应遵循以下原则。

1) 可持续性原则。自然资源是人类生存和发展的物质基础，人类社会的可持续发展取决于自然资源的可持续利用性。因此，在生态环境影响评价中，首先应遵循可持续性原则，保护自然资源，特别是保护那些关系到生存的资源。比如土地资源、水资源、生物资源等，使其可持续利用。同时，要保护区域可持续发展所必须的生态功能。

2) 科学性原则。从可持续发展战略出发，生态环境影响评价的主要目的和根本任务是保持生态系统的环境功能，满足区域可持续发展对生态环境的要求。因此，在生态环境评价中，应遵循科学性原则，即层次性、整体性、区域性、特别性和生物多样性保护的优先性原则，阐述生态环境影响的特点、途径、补偿、性质、强度和可能的后果，寻求有效的保护、恢复、补偿、建设与改善生态环境的途径。

3) 针对性原则。不同区域生态环境既有共同具备的共性，又有特别的个性。因此，在生态环境影响评价中，必须因地制宜，针对具体的开发建设活动、具体受影响的生态环境特点，开展卓有成效的分析与评价。

4) 政策性原则。生态环境影响评价是为国家或地方的决策提供依据，因此，在评价中应坚持政策性原则，以国家的资源环境政策和可持续发展战略为基本出发点，以法规为准绳，明确开发建设者的环境责任，实施对生态环境的有效管理。

5) 协调性原则。生态环境影响评价涉及面广、综合性强、影响较大，因此，在评

价中应坚持协调性原则，协调好生态保护与经济发展、整体利益与局部利益、长远利益与当前利益、企业与社会、区域开发与项目建设、生态系统与生态因子、生态环境的开发与生态补偿等的关系，提高评价的有效性与可操作性。

(二) 区域生态环境影响评价

区域生态环境影响评价是在自然地理单元或社会政治经济单元内，从资源、环境质量、社会发展诸方面，分析论证该地域经济发展规划和拟开发建设活动的合理性与可行性。提出功能规划和污染物总量控制及集中治理方案，努力使区域开发建设活动与资源合理利用、环境质量保护与改善相适应，促进区域可持续发展。区域生态环境影响评价的程序大致分为：确定评价整体框架、生态环境调查、生态分析与评价、生态规划与措施编制等四个阶段(图 17-9)。

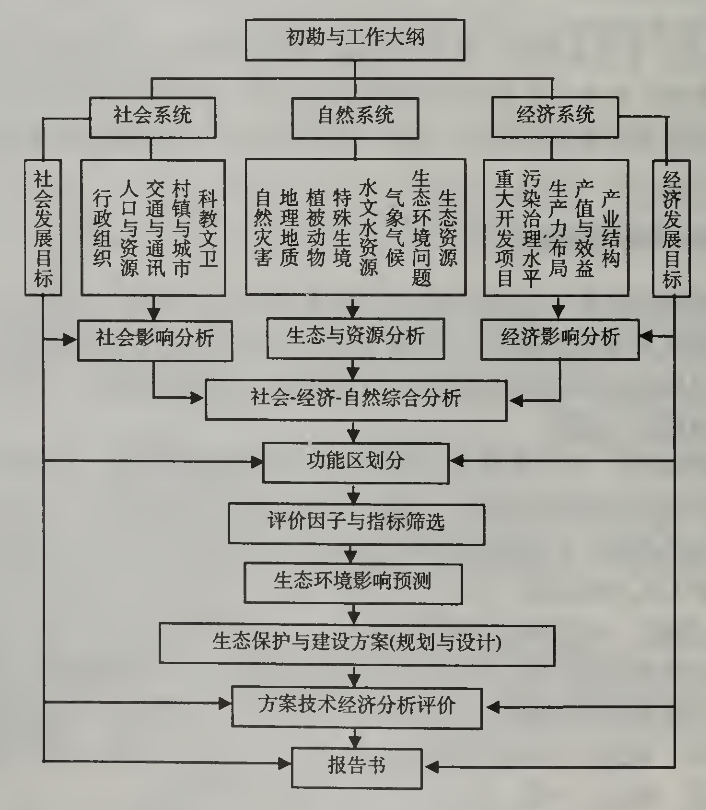


图 17-9　区域生态环境影响评价程序

1. 确定评价整体框架

根据评价任务，进行信息收集和初步现场踏勘，识别生态环境影响和生态环境问题，确定评价的主要对象、评价范围，明确评价目的；进而建立评价准则，确定评价标准和生态环境保护目标，在此基础上确定工作的整体框架和编制评价大纲。

2. 区域生态环境调查

区域生态系统是一个社会-经济-自然复合生态系统，可划分为社会、经济和自然三个子系统，各个子系统之间又可分为不同层次的子系统，并且彼此互为环境。这些组分以及相互间的作用，构成了复合生态系统的基本结构与运行特征。

1) 自然系统调查。区域自然子系统是生态环境评价调查的重点，包括既相互联系又相互区别的自然资源调查和生态与环境调查两部分。主要调查内容如表 17-10 所示。

表 17-10　自然系统调查内容

自然资源调查	生态环境调查
水资源	地理地质条件
生物资源	区域特殊生态系统、特殊生境或敏感生态环境保护目标
气候资源	区域生态环境问题
土地资源	区域自然灾害
矿产资源	区域污染危害
海洋资源	区域生态系统的历史演变
特殊或稀有资源	其他需要特别调查的内容

2) 社会系统的调查。对生态环境影响评价有重要作用的社会子系统调查内容包括：人口和交通规划、交通情况、人类聚落、行政管理等方面。此外，社会调查还应了解区域各阶层民众对发展的要求，所关心的焦点问题等。

3) 经济系统调查。区域经济子系统对生态环境影响较大的因素有生产力布局、产业结构、重大开发建设项目、污染物处置以及能流强度等。由于产业结构受区位条件、政策条件、投资环境等作用，受投资者意愿左右，并受市场影响，因而产业结构往往难以预断，这不仅对确定布局带来了困难，也对区域的整体发展战略与目标有很大影响。但区域规划的整体设想和目标、政策以及可能入区的重大项目，区域资源赋存及开发意向等，可作为生态环境的影响因素予以调查和分析。

3. 区域生态分析与评价

区域生态分析与评价是在生态调查的基础上进行的，它是区域生态环境影响评价程序中最关键的阶段。这个过程主要包括区域生态分析(结构、过程、功能分析)，资源态势分析，生态环境影响分析；在分析的基础上进行生态功能分区，建立功能区保护目标和确定评价因子与指标；然后根据社会经济发展目标和生态环境特点进行影响预测和影响综合分析与评价。

(1) 区域生态系统分析

区域生态系统分析主要包括生态结构、生态过程和生态功能分析三部分。

1) 生态结构分析。分析区域生态系统类型、分布，各生态系统的组成特点。

2) 生态过程分析。分析生态系统能流、物流情况，即生态运行过程；各生态系统间的相互联系与相互作用；区域内外生态系统的相互关联与作用等。

3) 生态功能分析。分析区域各生态系统的资源生产功能和环境功能；分析区域可持续发展的生态环境功能需求以及评价生态系统对这种需求的满足程度，所评价区域在更大区域中的生态环境功能。

生态分析一般还包括区域可持续发展制约因素的分析，主要生态环境问题的分析，特殊生态环境问题的分析等。

(2) 区域资源态势分析

1) 区域资源态势分析的主要内容。包括资源种类分析、资源优势分析、资源利用合理性分析、生物资源生产潜力分析、土地资源潜力分析、区域可持续发展资源供需分析、特殊和特有资源分析等。

2) 区域资源态势分析的基本原则。在分析资源利用的合理性和规划资源的利用方式时，应遵循优先考虑生存资源的永续利用，保护稀缺资源，保护资源的稀有和特殊用途，可再生资源的用养结合、采补平衡等原则。

(3) 区域生态环境影响分析

影响分析包括经济系统(含重大工程项目)对生态环境的影响，社会系统对生态环境的影响和生态因子相关分析三个部分。

1) 识别经济社会影响因素。根据开发建设规划和拟建设的重大工程或项目等，列出其中有较大的环境影响的开发建设活动。

2) 识别生态影响因子。根据区域生态环境特点，按组成生态系统的生物因子与非生物因子、生态系统存在与运行要求、生态系统生产功能与环境功能，识别可能受影响的生态环境。

3) 生态影响矩阵分析。在上述分析的基础上，建立生态影响矩阵，分析社会经济的每项活动对各生态因子的潜在影响。为全面认识这种影响，可采用专家问卷调查法和举行专家座谈会，汇集多学科专家的意见进行判别。此外，为进一步研究或探询那些对区域生态具有根本性影响的因子，有时还应做生态因子相关性分析，并对直接影响和间接影响进行综合分析。

(4) 区域社会-经济-自然复合生态系统综合分析

区域社会-经济-自然复合生态系统综合分析的目的是为了进一步认识区域生态系统的环境功能及其对区域社会经济发展的保障作用；认识区域生态环境现状与区域社会经济发展的协调程度；明确生态环境所受的主要影响及存在的主要社会问题；研究改善区域生态环境的主要方向和途径。区域生态环境影响评价的社会-经济-自然复合生态系统综合分析以生态环境功能保护为基本出发点。综合分析主要包括以下内容：

1) 生态环境的人口和经济承载力分析。包括水资源对人口和经济的支撑能力分析、合理的土地可开发利用量及其对人口和经济的支持能力分析、污染承载能力分析。

2) 土地利用适宜度分析。包括农业与菜篮子工程用地，生态功能维持用地，适宜居住地和商贸区，港口、码头和交通用地，工业用地等。

3) 生态环境与资源相关性分析。在生态系统分析和资源分析的基础上，明确本区生态系统的特点和可利用的生态资源，分析二者的相关关系，特别是那些能形成一定规模产业的资源和对社会发展有重要意义的生态系统和景观，应作为重点分析对象，分析

其对生态环境保护的依赖程度和保护要求。

4) 生态环境与社会经济发展的协调性分析。综合分析生态系统环境功能与社会经济发展的关系，明确社会经济发展对区域生态功能的要求以及功能的可达性，找出限制生态环境功能的主要环境因素和影响这些功能的主要社会问题，分析现状人口和经济布局、结构的生态环境合理性等，进一步验证生态功能分区的合理性和为实施生态环境建设工作打下基础。

5) 生态环境敏感性分析。分析与评价区域内各生态系统或景观板块对人类干扰的反应性，包括可逆与不可逆反应，恢复功能强弱等，借以明确区域内生态系统的脆弱性程度，以便采取有针对性的保护与建设措施。

4. 生态规划与措施编制

(1) 区域生态环境功能区划

区域生态环境功能规划是区域生态环境影响评价中最具有实质性意义的工作之一。影响区域生态环境功能区划或对区域生态规划起决定作用的是区域生态环境的特征。

区域生态环境功能区划一般以土地合理利用为最终表达形式。它是从人类生态学的基本思想出发，经过生态、经济、社会综合分析与评价，以未来的区域可持续发展为目标进行的土地利用规划和生态环境分类、分区。

1) 功能区划的基本原则。遵循以自然属性为主、兼顾社会属性，突出主要功能、兼顾其他功能，满足可持续发展要求、注意区域发展动态性，注重资源保护、着眼长远利益，尽可能与行政区划相协调、有利于建设和管理的原则，进行区域生态环境功能区划。

2) 生态功能区划类型。生态功能区可分为重要资源生产与保护区，应保护和保留的自然景观或自然生态系统，为防止污染和自然灾害、维持区域生态环境和社会经济稳定的人工或自然生态系统，为消纳区域社会经济活动生产的废水、固体废物而设立的设施等功能区四个类型(表 17-11)。

3) 生态功能区划方法选择。生态功能区划方法可因区划对象的特征和复杂程度、区划的目的与要求水平、参与区划的人员知识结构和偏好以及拥有的条件等做出不同的选择。目前用于生态功能区划的方法主要有定性分析、专家咨询、生态叠图、聚类分析、层次分析等，这些方法各有长短。无论采用哪种方法，最重要的和起作用的是对区域生态环境的全面调查和透彻理解与认识。

(2) 区域生态环境影响与评价

1) 预测内容。区域生态环境影响预测应考虑区域开发建设的滚动发展性质和不确定性加大的特点。从影响对象和影响后果等全过程考虑，区域生态环境影响预测一般应考虑影响因素分析、生物资源生产力影响预测、水资源影响预测、区域生态系统结构影响预测、区域生物多样性影响预测、生态环境功能影响预测、特殊生态环境保护目标影响预测、区域主要生态环境问题预测、区域生态环境风险预测、社会文化影响预测等方面的内容。

2) 预测方法选择。区域生态环境影响预测一般采用定性分析与定量分析相结合的

方法。定量预测或模式计算依预测内容和资料拥有程度而选择。一般资源影响可进行定量与半定量分析预测，生态环境功能预测可采用半定量或定性分析预测。

表 17-11　区域生态环境影响评价中常见的功能区

功能区	内涵	区划原则	功能保护措施与要求
水源地	地表水、地下水、集水区	资源分布决定布局	防止污染、增加植被覆盖
集中绿地	防护林、绿色隔离带等	因害设防、分布和结构合理	立法管护、增加植被覆盖率
自然保护区	珍稀动植物	法定、科学发现、地方指定	防止侵占、破坏、污染、保护生境
特殊生境	湿地、森林、珊瑚礁等	保护生物多样性、自然条件决定	增加植被、工程措施管护
自然灾害防护区	地质灾害易发区、极端水土流失区、河道、海岸等	因害设防，历史和自然条件决定	增加植被、工程措施管护
自然地	荒山荒滩，难利用土地	自然条件决定、区域生态特点	保护自然性、防止破坏与蚕食
风景旅游地	山水、海滨、人文景观	历史和自然条件决定，远离工业区	保护景观，防止破坏和污染
公园	绿地率、景观	靠近居民区、利用自然条件	景观建设，加强绿化
农业区	菜篮子工程、农田、果园	尊重现状、保存优质土地	立法保护、防止侵占、水源保证、林带建设
特产区	农副业特产出产地	自然条件决定、历史沿革	立法保护、防止侵占和污染
居民区	医院、运动场、中小学等	上风向、集中、无交通干线穿越	勿近险地、防止污染、留有绿地、景观建设
交通网络	交通干线与城市道路	进出方便，近工业区	道路绿化，防止噪音
商贸区	商贸及服务设施	大集中小分散、方便居民	绿化美化建设
港口码头	水域、岸带、交通线	自然条件决定	防止水域污染、防灾
车站与交通枢纽	运行与维修设施，线路	近工业区、远居民区、进出便捷	防止污染、加强绿化建设、防止噪音
工业区	重工业与加工工业	下风向、水流下游、近交通线、集中、与居民区隔离	污染防治、加强绿化
文教区	大中学校与科研机构	无污染、安静、环境优美区域边缘或相对独立的地理单元、近居民区	绿化美化、景观建设
特别保护地	疗养区、人文景观、历史遗迹	自然条件和历史决定	立法保护、防止污染破坏
废水消纳地	污水处理厂、纳污水域	下风向、远离居民区、水系下游	绿化、卫生隔离带
固废消纳地	垃圾处置、填埋与焚烧地	远离居民区、安全、不污染地下水	防洪防渗、加强管理、事后覆盖复垦
外围防护区	水源区防护林带	对区域生态环境有重要影响	根据具体条件

3）综合影响评价。由于区域生态环境的复杂性，在选择一定的指标对生态环境的主要特征、问题、功能进行预测后，还应有一个由此及彼、由表及里、由局部到整体的分析过程。同时，还应说明在规划目标和内容下，区域生态系统的总体变化趋势，生态环境功能的变化程度，区域自然资源和生态环境对人口和经济承载能力，影响区域可持续发展的主要生态环境问题以及区域功能目标的可达性等。

(3) 区域生态环境保护方案与措施

编制区域生态环境保护方案是全部生态环境影响评价工作的重心，是其工作成果的集中体现，同时也是区域生态环境保护长期遵循的科学依据。

1）编制区域生态环境保护方案的原则。应遵循突出建设性、突出政策性、突出协

调性、强化管理、刚性与弹性相结合等原则进行编制。

2) 区域生态环境保护方案的基本内容。包括提出区域生态环境管理的政策性建议、提出生态环境管理方案、提出生态环境功能分区方案、提出生态工程建设方案等方面的内容。

3) 方案措施的技术经济论证。主要内容是匡算生态环境保护措施的投资需求(投资额、投资方向、投资期等)和投资效益，主要是投资的生态环境功能保护与提高的效益，包括直接的对社会经济保护效益和间接的社会经济保障效益。

第八节　案例：山西生态环境经济损失分析

一、山西生态环境现状

山西地处黄土高原生态脆弱带，温带大陆性季风气候，复杂的地形，稀疏的植被，对山西生态环境影响深刻。山西作为全国能源重化工基地，长期以煤炭为主的资源型经济发展，加剧了其生态环境的恶化。目前山西为全国生态破坏最严重、环境质量最差、可持续发展能力最低的省份之一，生态环境形势严峻。主要表现为：

(一) 自然生态破坏严重

1. 水土流失严重

山西为全国水土流失最严重的地区之一，水土流失面积高达 1083 万 hm^2，占全省总面积的 69%，主要分布在晋西、晋西北。同时，荒漠化以每年 10m 的速度向南扩展，使沙尘暴天气频发。

2. 森林破坏，草地退化

山西森林覆盖率为 11.72%，比全国平均水平低 2.2%，居全国第 22 位。人均森林面积为 $0.04hm^2$，仅为全国平均水平的 38%。山西草场资源丰富，占全省总面积的 21.85%，但目前已有 95%的草地退化，其中 1/3 的草地退化达 4~5 级水平。

3. 水资源短缺

山西为全国最缺水的省份之一，长期采煤既破坏了地下水系，又污染了地表水源，使原本缺水的山西雪上加霜。而高耗水工业比重高、农业和生活用水浪费惊人等，使水资源供需矛盾日益尖锐。全省人均水资源为全国平均水平的 17.6%，居全国倒数第 2 位，年缺水量达 19.4 亿 m^3。

4. 环境污染严重

山西为全国环境污染最严重的省份之一，在全国 30 个污染最严重的城市中，山西占了 13 个。在世界污染最严重的 30 个城市中，省城太原位居榜首。全省人均排污量为

全国平均值的 2.9 倍，其中 TSP 和二氧化硫排放量为全国平均值的 6.57 倍，烟尘排放量为全国平均值的 7 倍。

（二）区域可持续发展能力不足

自然生态环境的破坏，必然波及到社会生态环境，使其质量降低。据中国科学院可持续发展研究组的《2000 年中国可持续发展战略报告》对全国各省、市、自治区可持续发展能力总体评估的结果，山西生态环境和社会经济对可持续发展的支持能力在全国处于最差的地位，被认为是不适于人类生存的区域。比如生存支持系统排序，山西位居全国倒数第 1 位；环境支持系统排序，山西位居全国倒数第 4 位；发展支持系统排序，山西位居全国倒数第 5 位；区域可持续发展总体能力排序，山西位居全国倒数第 6 位。

二、山西生态环境破坏经济损失评价分析

生态环境经济损失评价，可从生态环境功能价值和预防生态环境恶化费用以及恢复受损生态环境费用的角度来评价计算。主要采用恢复费用法、市场价值法、旅行费用法等来分析。

（一）水土流失损失分析

水土流失损失包括两部分内容，一是多年来由于水土流失导致农业、林业等减产而造成的损失(这里按 20 年计)；二是现有水土流失土地彻底治理的费用。由于水土流失主要以农田、林地和草地为主(表 17-12)，导致土壤肥料流失，土壤贫瘠化，所以 20 年来水土流失造成农林牧业减产等累积损失，可以用氮、磷、钾肥折算，即用替代市场价值法求得。山西表土比较瘠薄，一般全氮含量为 0.04%~0.10%，取其平均值约为 0.07%，平均侵蚀模数为 3000t/km^2，1999 年水土流失面积为 1083 万 hm^2，每吨氮肥按 2000 元计，这样每年水土流失损失氮肥约为 4.5 亿元，20 年水土流失累计损失氮肥为 84.6 亿元；山西土壤全磷含量平均为 0.071%，同样依据侵蚀模数计算，每年水土流失损失 P 肥约为 5 亿元，20 年水土流失累计损失磷肥为 93.2 亿元；山西土壤全磷含量大约为 0.0131%，每年水土流失损失磷肥约为 3.5 亿元，20 年水土流失累计损失磷肥为 56.1 亿元；山西 20 年水土流失累计损失氮、磷、磷肥为 233.9 亿元。

山西水土流失治理费用可以用造林种草、坡地梯田化等措施以及治理后的管理费用来估算。由于现有水土流失面积的一半可以彻底治理，另一半只要停止人为干扰，就可自行恢复。因此按水土流失面积的 50%计算治理费用，平均 1hm^2 水土流失土地需 2 万元治理费用，采用恢复费用法计算，水土流失治理费用需 810 亿元。

山西 20 年水土流失总损失为 1043.9 亿元。

表 17-12　山西 1980~1999 年水土流失面积的变化(单位：万 hm^2)

年份	水土流失总面积	农田面积	林地面积	草地面积
1980	949.6	284.0	399.0	266.9
1985	949.6	285.0	408.0	257.0
1990	996.5	299.0	418.5	279.0
1995	1061.0	318.3	424.4	318.3
1999	1080.0	324.0	454.0	302.0

(二) 土地沙漠化损失分析

土地沙漠化损失包括四部分内容：一是多年来沙漠化造成粮食减产的损失；二是沙漠化引起草地产量减少，对畜牧业造成的损失；三是沙漠化引起景观消失，影响旅游业造成的损失(间接损失)；四是治理现有荒漠化土地所需的费用。其中前三项可用替代市场法计算，后一项用恢复费用法计算。

山西省土地沙漠化是逐渐加重的，面积逐年扩大(表 17-13)。据 1999 年监测资料，晋西北和晋北 18 个县共有沙化土地面积 78.36 万 hm^2，其中流动沙地 0.28 万 hm^2，半固定沙地 25.05 万 hm^2，固定沙地 40.52 万 hm^2，闯田 12.51 万 hm^2，沙化程度不同，损失大小是不一样的，综合考虑，各类沙地平均损失粮食产量的 20%，即 1hm^2 减收 300kg(晋西北平均亩产 100kg)，1999 年损失粮食 1.56 亿 kg，折合价值 2.03 亿元。20 年损失约为 17.96 亿元。沙漠化影响草地鲜草产量减少 30%左右，在晋西北草地产量约为 13 000kg/hm^2，减少鲜草总量为 9.8 亿 kg，一只标准羊需要鲜草 1460kg，1999 年损失价值 0.8 亿元，20 年损失约为 12.33 亿元。景观消失影响旅游的价值，可按旅游收入的 10%计算，晋西北和晋北年旅游收入约 1000 万元，因荒漠化影响平均每年减少旅游收入 100 万元，20 年损失约 2000 万元。三项加起来，因荒漠化 1999 年损失价值 2.83 亿元，20 年累积损失 30.49 亿元。

表 17-13　山西 1980~1999 年土地沙漠化面积的变化(单位：万 hm^2)

年份	荒漠化总面积	农田面积	草地面积	沙荒地面积
1980	60.90	37.80	21.30	0.91
1985	65.85	42.64	21.73	1.04
1990	72.60	47.20	23.96	1.01
1995	76.45	50.46	24.50	1.15
1999	78.36	52.10	25.06	1.20

山西荒漠化程度较低，治理以生物措施为主，工程措施为辅，所需费用较低，平均 1 hm^2 沙化土地需治理费用 6 万元，按现有沙化面积的 80%计算治理费用(其余 20%沙化土地在其他地方治理好后，可自行恢复)，需 376.13 亿元。

山西土地荒漠化总损失为 406.62 亿元。

（三）土地盐渍化损失分析

土壤盐渍化是土地退化的一种形式。由于盐分聚集，改变了植物生长的土壤条件，限制农作物的生长发育，影响农业产量。山西盐渍化土地都分布在盆地，所以都是农业用地。盐渍化土地一般减产在 20%以上，严重的就不能耕种。山西现有盐渍化土地 53.7 万 hm^2，每年减产粮食 3.22 亿 kg，折合价值 3.86 亿元，20 年累计损失 77.2 亿元。

对盐渍化土地的治理主要是通过灌水洗盐、选育栽培抗盐品种等措施，盐渍化土地的治理费用大约为 8 万元/hm^2(干旱区为 8~14 万元/hm^2)，按盐渍化面积的 50%计算治理费用，共需治理费用 214.8 亿元。

山西盐渍化土地总损失为 292 亿元。

（四）森林破坏恢复费用

山西 50 多年来一直很重视林业建设，每年都大力绿化荒山，发展林业，到现在森林覆盖率已达 11.7%。尽管多年来造林面积非常大，但由于边建设边破坏，森林总面积增加缓慢。森林破坏恢复费用包括两部分，一是每年造林所需的经费，二是森林管理和维护费用。在过去 20 年中，年均造林面积达 2.5 万 hm^2(表 17-14)。造林费用约为 2 万元/hm^2，1999 年恢复森林费用为 17.6 亿元，20 年累积森林恢复费用为 276 亿元。同时按照国际标准，森林覆盖率达 30%以上时，才能充分发挥其在调节气候、涵养水分、保护农田、净化空气等方面的生态功能，所以森林破坏后的恢复费用按山西森林覆盖率提高到 30%所需费用来计算。依据山西林业建设规划，今后 15 年山西森林覆盖率将达到 30%，按 1hm^2 造林费用约 4 万元，山西森林恢复费用尚需 720 亿元。森林维护管理费用，20 世纪 80 年代平均每年全省约为 150 万元，90 年代管理成本大幅上升，平均每年需 300 万元，过去 20 年总维护管理费用约为 0.45 亿元。两项加起来，山西森林恢复费用为 276.45 亿元。

山西森林破坏总损失为 996.45 亿元。

表 17-14　不同时期山西的造林面积(单位：万 hm^2)

年份	1980	1985	1990	1995	1999	年均
造林面积	1.5	3.0	6.5	6.6	8.8	2.5

（五）草地退化损失分析

山西天然草地 376.39 万 hm^2，95%以上都有不同程度的退化，1999 年退化程度达到 3 级或 3 级以上的约有 238.2 万 hm^2(表 17-15)，这些草地的生产力已受到很大影响。全省草地平均产草量按 15 000kg/hm^2 鲜草计算，退化影响产草量平均按 15%计，因草地

退化每年减少鲜草产量 53.59 亿 kg。一头标准绵羊每年所需鲜草 1460kg，则年损失 370 万只标准羊，每只标准羊按 200 元计算，则 1999 年因草地退化损失价值为 7.4 亿元。20 年累计草地退化损失值为 153 亿元。再加上过去 20 年草地建设、草地改良投资约为 2.5 亿元，草地退化总损失值为 155.5 亿元。

退化草地的恢复费用一般按 5 级退化草地需要 5 万元/hm^2、3~4 级退化草地需要 3 万元/hm^2 估算。山西退化草地面积按 180 万 hm^2 计算，则恢复费用大约需 540 亿元。

山西草地退化损失为 695.5 亿元。

表 17-15　不同时期山西 3 级以上草地退化面积　(单位：万 hm^2)

年份	1980	1985	1990	1995	1999
3 级以上草地退化面积	201.5	285.4	276.3	240.5	238.2

(六) 工矿区土地破坏损失分析

工矿区土地破坏是山西最突出的生态问题之一，1999 年累积破坏已达 75.6 万 hm^2，但这部分被破坏的土地大多分布在山区，耕地比例不算高(表 17-16)，农田面积约为 35 万 hm^2，土地破坏引起的损失按每年每公顷破坏耕地平均损失粮食 300kg 计算，总损失粮食 1.05 亿 kg，折合价值 1.26 亿元，20 年损失合 24.18 亿元。破坏的林地以木材生长量损失计，山西一般森林平均年生长量为 1.85m^3/hm^2，1999 年年土地破坏损失森林生长量 33.3 m^3，折合价值 1.66 亿元，20 年累积损失 31.8 亿元。破坏的草地平均每公顷减少鲜草产量 5000kg，1999 年减产鲜草 11.3 亿 kg，损失 77 万只羊单位，折合价值 1.5 亿元。20 年累积分别计算，损失约为 31.1 亿元。此外，大面积的煤矸石、尾矿等废弃物淋溶水进入河流或流入农田，对作物有毒害作用，估计每年会使粮食损失 0.5 亿 kg，折合价值 0.6 亿元，20 年损失为 1.56 亿元。以上各项合计，20 年的累积损失值，粗略估计为 88.64 亿元。

表 17-16　1980~1999 年工矿区土地破坏面积的变化(单位：万 hm^2)

年份	破坏总面积	农田面积	林地面积	草地面积
1980	72.65	32.00	15.26	25.39
1985	72.90	33.50	17.50	21.30
1990	73.15	33.60	17.60	22.30
1995	73.40	33.80	17.47	22.00
1999	75.60	35.00	18.00	22.60

工矿区土地破坏的恢复费用，按 50%的可治理率计算，平均 1hm^2 工矿区破坏土地需 10 万元计算，山西工矿区土地恢复费用需 378 亿元。

山西工矿区土地破坏总损失为466.64亿元。

(七) 自然灾害损失分析

生态环境破坏，使自然灾害频繁，对农业的危害极大，使农业成灾受灾面积有扩大趋势(表 17-17)。现以 1998 年为例计算农业灾害的损失值。1999 年全省旱灾、洪涝灾、风雹灾、低温冷冻灾等自然灾害发生面积达 329.4 万 hm^2，成灾面积 282.3 万 hm^2，造成农业经济损失达 25.66 亿元。1990~1999 年总受灾面积为 2106.4 万 hm^2，按 1998 年损失值比例计，90 年代农业灾害损失值为 198 亿元。80 年代以 1986 年为例计算农业灾害的损失值，1985 年全省农业灾害发生面积达 213.3 万 hm^2，成灾面积 86.5 万 hm^2，造成农业经济损失 4.32 亿元。1980~1989 年总受灾面积为 2248.4 万 hm^2，按 1985 年损失值比例计， 80 年代农业灾害损失值为 45.6 亿元。过去 20 年因自然灾害造成的农业损失约为 243.6 亿元。

表 17-17　1980~1999 年山西受灾成灾面积(单位：万 hm^2)

年份	受灾面积	成灾面积	年份	受灾面积	成灾面积
1980	309.6	135.5	1990	209.4	135.1
1981	270.5	179.7	1991	323.2	260.9
1982	179.0	101.3	1992	287.1	210.4
1983	174.0	86.1	1993	252.6	197.2
1984	191.7	133.5	1994	256.0	182.4
1985	2133	86.5	1995	303.4	249.5
1986	249.9	137.3	1996	195.5	136.8
1987	283.3	124.2	1997	335.8	2556
1988	127.1	43.8	1998	273.1	196.2
1989	250.0	164.9	1999	329.4	282.3

自然灾害的减少可在森林建设、草地恢复、荒漠化治理、水土保持等方面工作初见成效的基础上逐步实现，所以在自然生态环境尚不能彻底好转之前，需设立自然灾害防治专项费用。以便减灾防灾，减少损失。比如人工增雨、建设水利工程等。这些措施实施所需费用，按每年投资 5 亿元估计，根据规划用 15 年时间彻底改变山西生态环境条件，则需总投资 75 亿元。

山西自然灾害总损失约为 318.6 亿元。

(八) 环境污染损失分析

山西环境污染的经济损失包括大气污染经济损失、水污染经济损失、工业固体废弃物污染经济损失等方面，逐一对这些损失做年度分析，并在年度分析的基础上进行累计分析。据此计算，1999 年环境污染损失分别为大气污染 44.16 亿元、水污染 21.2 亿元、工业固体废弃物污染 21.35 亿元、地质环境破坏 5.7 亿元(年均值)，20 年环境污染

累计经济损失分别为大气污染 424.2 亿元、水污染 153 亿元、工业固体废弃物污染 334 亿元、地质环境破坏 114.3 亿元。据统计，1999 年山西用于环境保护投资为 8.92 亿元，其机会成本的损失为 23.19 亿元。20 年累计用于环境保护的投资为 61.7 亿元、机会成本损失为 197.4 亿元。

山西环境污染总损失约为 1284.6 亿元。

(九) 社会生态环境损失分析

社会生态环境受自然生态环境影响，包括旅游环境、投资环境、人才环境等，有的是无法用金钱来衡量的，这里仅考虑旅游环境破坏造成的损失。1999 年山西旅游外汇收入 4256.8 万美元，折合人民币 3.53 亿元；国内旅游收入 62.87 亿元。按环境质量差影响旅游收入的 10%估算，1999 年因生态环境恶化造成的旅游收入损失为 6.64 亿元。分阶段估算，20 年累计旅游收入损失为 49.85 亿元。

山西社会生态条件损失为 49.85 亿元。

以上各项生态环境损失分析结果汇总于表 17-18 中。

表 17-18　山西生态破坏经济损失分析一览表(单位：亿元)

生态环境破坏类型	1999 年损失值	过去 20 年累计损失值	未来损失值(恢复费)	总损失值
水土流失	4.50	233.90	810.00	1043.90
土地荒漠化	2.83	30.49	376.13	406.62
土地盐渍化	3.86	77.20	214.80	292.00
森林破坏	17.60	276.45	720.00	996.45
草地退化	7.40	155.50	540.00	695.5
工矿区土地破坏	5.02	88.64	378.00	466.64
自然灾害	23.66	243.60	75.00	318.60
环境污染	124.52	1025.50	259.10	1284.60
社会生态条件恶化	6.64	49.85	-	49.85
合计	196.03	2181.13	3373.03	5554.16

三、生态环境治理对策建议

(一) 加强宣传，提高对生态环境治理的认识

面对山西日益严重的生态环境破坏问题，国家和地方都要高度重视，要从讲政治的高度和可持续发展战略的高度，深刻认识山西生态环境治理问题。各级政府和媒体应加强生态环境保护宣传教育，广泛宣传生态环境治理的意义，使广大公民真正认识到生态环境治理不仅关系到人民的生活水平的改善，关系到可持续发展，而且也关系到国家的安全与稳定。只有这样才能提高全体公民治理和保护生态环境的主动性。

（二）加大资金投入，加快污染治理

近年来的生态建设和治理实践表明，只要在生态治理上有投人，生态环境治理设计合理，就会产生明显的综合效益。比如小流域水土流失治理模式，综合效益明显。而治理速度较慢、全省整体效益不十分明显的主要原因是投入太少。从上述各项损失分析中可知，要加大资金投人，坚持以国家投资为主，集体、个人投资为辅的原则。实行环境责任和排污许可证制度，坚持预防为主、防治结合、综合治理、污染者付费和谁污染谁治理的环境保护政策。以污染治理、水土保持为核心，重点抓好以下工作：一要坚持不懈地搞好水土保持。完善水土流失治理法规与实施办法，加大治理力度，以小流域为单元，工程措施与生物措施相结合，综合治理水土流失。二要加快治理工业污染。抓好治污工程建设，综合治理“三废”污染。大力调整工业结构与布局，实行清洁生产和原材料多级利用，减少资源浪费，降低污染物排放量。三要建立生态环境示范小区。加强生态农业、清洁能源、生态工业园等示范小区建设，带动全省生态环境的改善。

（三）依法管理生态环境

现在我国已有不少生态保护的法律，比如《森林保护法》、《草原法》、《水土保持法》等。但这些法律的执行并不乐观，滥垦、滥伐、过牧、乱挖等生态破坏现象屡禁不止。因此为彻底改善生态环境，必须加大立法和执法力度，制定和实施山西省生态环境保护地方法规和监管制度，对重大工程项目的建设要进行环境影响评估。坚决取缔无证经营、非法排污，依法严惩各种破坏生态环境的犯罪行为。强化生态环境的法制管理，坚决杜绝破坏生态环境的行为。否则即使投资加大，治理速度加快，也赶不上破坏速度。

（四）控制人口增长，提高人口素质

生态环境退化的一个重要原因是人口太多，尤其是农区、山区人口增长速度过快。由于人口素质低，粗放型的生产经营活动对生态系统产生的压力过大。在生态破坏严重的地区，人民生活都比较困难，因此必须从战略的高度重视人口控制问题。

（五）加强生态科学研究和人才培养

在生态环境退化及治理中，许多基础理论问题有待解决，需要加深对生态退化机制和恢复机理的认识。这就要加强基础研究，为生态退化的恢复和重建提供科学依据。在生态环境治理中，需要大量的技术人员、管理人员等，应加快培养。

（六）大力推广应用生态技术和工艺技术

全面调整技术和工艺发展的思路，加强有关大学、科研院所和企业的通力合作，搞好生态技术和生态工艺的应用、开发和创新研究。积极宣传和普及植树种草、水土保持、节水农业、生态产业建设等方面的知识。大力推广应用生态技术与工艺，比如地膜覆盖、清洁生产等技术。鼓励和扶持环保产业的发展，限期治理和关停重污染企业，逐步改善生态环境。

（七）建立健全环境监测网络和信息网络

对环境污染和生态破坏实行全过程控制，及时掌握全省环境质量和污染状况的变化。定时发布环境公报，自觉接受全体公民监督。

（八）转变传统发展模式，推动产业升级

加快产业结构的转换与升级是提高山西经济实力的关键所在，同时也是从根本上解决生态环境恶化的关键所在。要转变观念，大胆创新。以市场为导向，依靠科技，因地制宜，发挥优势，立足高起点、高效益。以发展潜力产品为突破口，以培育"一增三优"(新的经济增长点、优势产业、优势企业和优势产品)为主攻方向。通过择优扶强，重点培植，切实加强第一产业，改造提高第二产业，积极发展第三产业，建立具有山西特色的集约型产业结构新框架，推动山西可持续发展和生态环境的改善。

第十八章　可持续发展生态学

第一节　可持续发展生态学概述

一、可持续发展生态学的概念

持续(sustain)一词来源于拉丁文 sustenere，意思是“维持下去”或“保持高度增长”。针对资源与环境，则应该理解为保持或延长资源的生产使用性和资源基础的完整性，意味着使自然资源能够永远为人类所利用。

可持续发展一词最早出现于 1980 年国际自然保护同盟(IUCN)在世界野生生物基金会(WWF)的支持下制订发布的《世界自然保护大纲》(*The World Conservation Strategy*)。可持续发展(sustainable development)的概念来源于生态学，最初应用于林业和渔业，指的是对资源的一种管理战略，即如何将全部资源中的合理的一部分加以收获，使得资源不受破坏，而新成长的资源数量足以弥补所收获的数量。经济学家由此提出了可持续产量的概念，这是对可持续性进行正式分析的开始。

可持续发展生态学(sustainable ecology)是可持续发展的基础，它是研究可持续发展与其支撑系统生命系统、环境系统和社会系统之间相互关系的科学。可持续发展生态学的研究范围相当广泛。目前对其概念的理解或解释上，差异较大。这可以从下面对可持续发展的理解和解释上反映出来。

(一) 着重于从自然属性定义可持续发展

可持续性发展这一概念最初是由生态学家首先提出来的，即所谓生态持续性(ecological sustainability)，它旨在说明自然资源及其开发利用程度间的平衡。国际自然保护同盟(IUCN)1991 年对可持续发展的定义是“可持续地利用，是指在其再生能力(速度)的范围内使用一种有机生态系统或其他可再生资源”。同年，国际生态联合会(INTECOL)和国际生物科学联合会(IUBS)联合举行关于可持续发展问题的专题研讨会。该研讨会的成果发展并深化了可持续发展概念的自然属性，将可持续发展定义为“保护和加强环境系统的生产和更新能力”，即可持续发展是不超越环境系统再生能力的发展。从生物圈概念出发定义可持续发展是从自然属性方面表述可持续发展的另一种代表，即认为可持续发展是寻求一种最佳的生态系统以支持生态的完整性和人类愿望的实现，使人类的生存环境得以持续。

（二）着重于从社会属性定义可持续发展

1991 年国际自然保护同盟(IUCN)、联合国环境规划署(UNEP)和世界野生生物基金会(WWF)共同发表《保护地球——可持续生存战略》(*Caring for the Earth: A Strategy for Sustainable Living*)，将可持续发展定义为“在生存不超出维持生态系统承载能力的情况下，提高人类的生活质量”，并提出了人类可持续生存的 9 条基本原则。这 9 条基本原则既强调了人类的生产方式与生活方式要与地球承载能力保持平衡，保护地球的生命力和生物多样性，同时又提出了可持续发展的价值观和 130 个行动方案，着重论述了可持续发展的最终落脚点是人类社会，即改善人类的生活质量，创造美好的生活环境。

（三）着重于从经济属性定义可持续发展

这类定义有不少表达方式，但不论哪一种表达方式，都认为可持续发展的核心是经济发展。当然，这里指的经济发展已不是传统意义上的以牺牲资源和环境为代价的经济发展，而是不降低环境质量和不破坏世界自然资源基础上的经济发展。巴比尔在其著作《经济、自然资源、不足和发展》中，把可持续发展定义为“在保护自然资源的质量和其所提供服务的前提下，使经济发展的净利益增加到最大限度”。还有学者认为，可持续发展是“今天的资源使用不应减少未来的实际收入”(Pearce　1990)。而经济学家 Costanza 等则认为“可持续发展是动态的人类经济系统与更为动态的，但在正常条件下变动很缓慢的生态系统之间的一种关系。这种关系意味着，人类生存能够无限的持续，人类个体能够处于全盛状态，人类文化能够发展，但这种关系也意味着人类活动的影响保持在某些限度内，以免破坏生态学上的生存支持系统的多样性、复杂性和基本功能”。

（四）着重于从科技属性定义可持续发展

实施可持续发展，除了政策和管理因素之外，科技进步起着重要作用。没有科学技术的支持，人类的可持续发展便无从谈起。因此，倾向于这一观点的学者认为“可持续发展就是转向更清洁、更有效的技术，尽可能接近‘零排放’或‘密闭式’工艺方法，尽可能减少能源和其他自然资源的消耗”。还有学者提出“可持续发展就是建立极少产生废料和污染物的工艺或技术系统”。他们认为污染并不是工业活动不可避免的结果，而是技术差、效益低的表现。他们主张发达国家与发展中国家之间进行技术合作，缩短技术差距，提高发展中国家的经济生产能力。

（五）布伦特兰的可持续发展概念

《我们共同的未来》提出可持续发展是“既满足当代人的需求，又不对后代人满足其自身需求的能力构成危害的发展”。这一概念在最一般的意义上得到了广泛的接受与

认可，并在 1992 年联合国环境与发展大会上得到全球范围的共识。可持续发展的这一概念鲜明地表达了两个基本观点，一是人类要发展，尤其是穷人要发展，要满足人类的发展需求；二是发展有限度，不能损害自然界支持当代人和后代人生存的能力。关于环境有限性的思想、技术状况以及社会组织的状况，决定了环境满足现在和未来的各种需求的能力是有限的。

二、可持续发展生态学的发展

(一) 可持续发展生态学的产生和兴起

1. 古代朴素的可持续性生态学思想

可持续性概念源远流长。早在中国春秋战国时期(公元前 6 世纪~公元前 3 世纪)就有保护正在怀孕与产卵的鸟兽鱼鳖以便“永续利用”的思想和封山育林定期开禁的法令。比如，春秋时齐国宰相管仲从发展经济、富国强兵的目标出发，十分注意保护山林川泽及其生物资源，反对过度采伐。他说，“为人君而不能谨守其山林菹草莱，不可以为天下王。”(《管子·地数》)战国时期的荀子也把自然资源的保护视为治国安邦之策，特别注重遵从生态学的季节规律，重视自然资源的持续保存和永续利用。

西方经济学家马尔萨斯(Malthus 1820)、李嘉图(Ricardo 1817)、穆勒(Mill 1900)等的著作中，也较早认识到人类消费的物质限制，即人类的经济活动范围存在着生态边界。

2. 现代可持续发展生态学的产生和兴起

(1) 可持续发展生态学发展的基本线索

可持续发展的产生和兴起源于人们对生态环境问题的逐步认识和热切关注。其产生背景是人类赖以生存和发展的环境与资源遭到越来越严重的破坏，人类已不同程度地尝到了生态环境破坏的苦果。以往人们对经济增长津津乐道，20 世纪中叶以后，随着“公害”的显现与加剧以及能源危机的冲击，生态环境问题频频困扰着人类。20 世纪 50 年代末，美国海洋生物学家 Carson 在潜心研究美国使用杀虫剂所产生的种种危害之后，于 1962 年发表了《寂静的春天》。作者通过对污染物富集、迁移、转化的描述，阐明了人类同大气、海洋、河流、土壤、动植物之间的密切关系，初步揭示了污染对生态系统的影响。她指出：“地球上生命的历史一直是生物与其周围环境相互作用的历史……，只有人类出现以后，生命才具有改造其周围大自然的异常能力。在人对环境的所有袭击中，最令人震惊的是空气、土地、河流以及大海受到各种致命化学物质的污染。这种污染是难以清除的，因为它们不仅进入了生命赖以生存的世界，而且进入了生物组织内。”她向世人疾呼，我们长期以来所走的道路，容易被人认为是一条可以高速前进的平坦、舒适的超级公路，但实际上，这条路的终点却潜伏着灾难，而另外的道路则为我们提供了保护地球的最后惟一的机会。这“另外的道路”究竟是怎样的，卡逊虽没能明确告诉我们，但作为生态环境保护的先行者，卡逊的思想在世界范围内，较早

的引发了人类对自身传统行为和观念进行比较系统和深入的反思。

1968 年美国、德国和挪威等一些西方学者成立了罗马俱乐部，发表了一系列有关资源环境与人类未来发展的研究报告，最著名的是 1972 年发表的《增长的极限》。该报告深刻阐明了环境的重要性以及资源与人口之间的基本关系。报告认为，由于世界人口增长、粮食生产、工业发展、资源消耗和环境污染这五项基本因素的运行方式是指数增长而非线性增长，全球的增长将会达到极限，经济增长将发生不可控制的衰退。因此，要避免因超出地球资源极限而导致世界崩溃的最好方法是限制增长，即“零增长”。《增长的极限》一发表，就在国际社会特别是学术界引起了强烈反响。该报告在呼吁人们密切关注人口、资源和环境问题的同时，因其反增长的论调而遭到一些人士的尖锐批评和责难。由此引发了一场激烈的、旷日持久的学术之争。一般认为，由于种种因素的局限，《增长的极限》的结论和观点，存在着明显的缺陷。但报告所表现出的对人类前途的“严肃的忧虑”以及唤起人类自身的觉悟，其积极意义却是毋庸置疑的。它所阐述的“合理的、持久的均衡发展”，为孕育可持续发展的思想萌芽提供了土壤。

1972 年联合国在斯德哥尔摩召开人类环境会议，来自 113 个国家和地区的代表共同讨论了环境对人类的影响，大会通过了《人类环境宣言》。它向全球呼吁：现在已经到达历史上这样一个时刻，我们在决定世界各地的行动时，必须更加审慎地考虑它们对环境产生的后果。由于无知或不关心，我们可能给生活和幸福所依赖的地球环境造成巨大的无法挽回的损失。因此，保护和改善人类生存环境是关系到全世界各国人民的幸福和经济发展的重要问题，是全世界各国人民的迫切希望和各国政府的责任，也是人类的紧迫目标。各国政府和人民必须为全体人民和自身后代的利益而做出共同的努力。它唤起了各国政府共同对环境问题的觉悟和关注，吹响了人类正式向环境问题挑战的号角。

1980 年 3 月 5 日，联合国向全世界发出呼吁：“必须研究自然的、社会的、生态的、经济的以及利用自然过程中的基本关系，确保全球持续发展。”1983 年 11 月联合国成立了以挪威首相布伦特兰(Brundland)任主席的世界环境与发展委员会(WCED)，负责制订长期的环境对策、研究能使国际社会更有效地解决环境问题的途径和方法。该委员会于 1987 年向联合国提交了研究报告《我们共同的未来》。该报告在系统地探讨人类面临的一系列重大经济、社会和环境问题后，提出了“可持续发展”的概念。它深刻地指出：在过去，我们关心的是经济发展对生态环境带来的影响，而现在，我们正迫切地感到生态的压力对经济发展所带来的重大影响。因此，我们需要有一条新的发展道路，这条道路不是一条仅能在若干年内、在若干地方支持人类进步的道路，而是一直到遥远的未来都支持全球人类进步的道路。这实际上就是 Carson 在《寂静的春天》中没能提供答案的、所谓的“另外的道路”，即“可持续发展道路”。布伦特兰鲜明、创新的科学观点，把人们从单纯考虑环境保护引导到把环境保护与人类发展切实结合起来，实现了人类有关环境与发展思想的重要飞跃。

1992 年 6 月联合国环境与发展大会在巴西里约热内卢召开，183 个国家的代表团和 70 个国际组织的代表出席了会议。大会通过了《里约环境与发展宣言》(又名《地球宪章》)和《21 世纪议程》两个纲领性文件。前者是开展全球环境与发展领域合作的框架性文件，是为了保护地球永恒的活力和整体性，建立一种新的、公平的全球伙伴关系的“关于国家和公众行为基本准则”的宣言，它提出了实现可持续发展的 27 条基本原

则；后者则是全球范围内可持续发展的行动计划，它旨在建立 21 世纪世界各国在人类活动对环境产生影响的各个方面的行动规则，为保障人类共同的未来提供一个全球性措施的战略框架。此外，各国政府代表还签署了联合国《气候变化框架公约》等国际文件及有关国际公约。可持续发展得到世界最广泛和最高级别的政治承诺。以这次大会为标志，人类对环境与发展的认识提高到了一个崭新的阶段。环境与发展大会为人类高举可持续发展旗帜，走可持续发展之路发出了总动员，使人类迈出了跨向新文明时代的关键一步，为人类的环境与发展矗立了一座重要的里程碑。

(2) 可持续发展生态学产生发展的动因

上述一系列标志性重要事件，粗略勾勒出可持续发展生态学产生和兴起的基本线索。然而，回顾半个世纪的历程，人类从无视生态环境问题，到开展生态环境保护；从单纯治理污染，到从社会、经济和生态环境协调发展的高度提出可持续发展的概念和理论；从学术界少数专家和学者对全球未来的忧思，到国际社会普遍接受和认同的可持续发展战略，并由各国积极付诸实践。在探索人类社会发展新模式的艰辛历程中，人类的认识和实践经历了一次次质的飞跃，一切都不是偶然发生的。可持续发展的概念一经提出，之所以能在较短的时间内得到国际社会的广泛认同，并成为使用频率最高的用语，必然有其与现代世界大背景相联系的、复杂而深刻的内在动因。

1) 人口与城市化的巨大压力。人类可持续发展的威胁首先在于人类自身生产的无节制。近一个世纪以来，世界人口的快速增长和城市化的迅速推进，使地球越来越不堪重负。据估计，从公元元年到 18 世纪末，地球平均约 350 年增加 1 亿人口。19 世纪世界人口增长速度加快，平均约 10 年增加 1 亿人口，而 20 世纪世界人口增加速度惊人，平均不足 5 年增加 1 亿人口。目前，世界人口已超过 60 亿人，并呈现继续增长的趋势，预计到 2050 年世界人口将达到 94 亿。要养活如此众多的人口，使本已脆弱的地球生态系统将不得不承受巨大的压力。与此同时，城市化进程的加快使不可持续的消费方式在世界范围内迅速传播，造成资源的过度消耗和生态环境的日益恶化。

2) 自然资源与生态环境的严重破坏。自工业革命以来的 200 年间，随着人口剧增和生活水平的提高，使人类经济活动的规模不断扩张。在以单纯追求经济增长为核心的传统发展观指导下，人类与自然的矛盾日益尖锐。特别是 20 世纪 70 年代以来，全球自然资源和生态环境破坏越来越严重，目前气候变化、臭氧层破坏、生物多样性减少、酸雨蔓延、森林锐减、土地荒漠化、大气污染、水资源短缺、海洋污染以及固体和危险废弃物污染等全球性问题，已威胁到人类的生存和发展。

3) 联合国及有关国际机构的推动作用。可持续发展的产生和兴起，联合国及有关机构的介入和引导起到了重要的推动作用。表现在，一是不断将人们有关环境问题及其所达成的共识通过宣言或声明等正式文件的形式加以概括总结，并固定下来，成为世界各国必须遵循的基本原则。二是成立专门机构来统一领导或协调全球环境保护行动，比如联合国环境规划署(UNEP)、世界环境与发展委员会(WCED)和可持续发展委员会(CSD)等。这些组织对可持续发展概念与理论的形成以及可持续发展战略的实施都做出了重要贡献。加之非官方组织，比如绿色和平组织等也在世界环保运动中发挥着不可忽视的影响力。三是通过制定《21 世纪议程》，将可持续发展从概念理论推进到具体行动的新阶

段，极大地促进了各国根据本国具体情况实施可持续发展战略的步伐。四是在联合国的主持下，各国经谈判以法律形式签订了一系列国际环境公约或协定，为推动可持续发展战略奠定了法律基础。比如《关于濒危物种的国际贸易公约》、《关于臭氧层损耗的蒙特利尔协定》等。

4) 经济发展和技术进步的支持。经济发展和技术进步为环境保护提供了重要的资金和技术支撑，二者是可持续发展不可缺少的重要条件。

5) 人类自身的内在需求。人类自身需求是可持续发展最根本的动力。人类作为自然的一员，与自然有着不可分割的内在联系。历史证明，人类永远都不可能摆脱或超越自然的约束而独立存在，对生态环境的需求是自人类产生起就客观存在的。随着社会的发展，当人类的物质需求得到相对满足以后，对美好生活环境的需求就越来越强烈地表现出来。这种需求一方面是公众环境意识提高，通过公共媒体的监督和呼吁，影响政府的决策，另一方面是转变消费方式，通过市场杠杆作用，引导全社会向可持续发展的方向迈进。

综上所述，可持续发展是在人类社会发展因人口急剧增加、城市化快速推进、自然资源遭到严重破坏、生态环境不断恶化等一系列外在压力而陷入困境时，在经济和技术发展到一定水平的条件下，由少数学者提出，经联合国及国际机构的组织和推动，而形成和发展起来的一场全球性国际运动。可持续发展作为人类社会发展的崭新模式，符合人类追求美好生活的需求和愿望，必然对人类的未来产生重大而深远的影响。

第二节　可持续发展的理论框架

可持续发展是一种从环境与自然资源角度提出的关于人类长期发展的战略模式，它不是在一般意义上所指的一个发展过程要在时间上连续运行、不被中断，而是特别指出环境和自然资源的长期承载能力对发展过程的重要性以及发展对改善生活质量的重要性。可持续发展的概念从理论上结束了长期以来把经济发展同保护环境与资源相互对立起来的错误观点，并明确指出了它们应当是相互联系和互为因果的。

一、可持续发展的内涵

(一) 可持续发展是一个综合的和动态的概念

可持续发展在代际公平和代内公平方面是一个综合概念，它不仅涉及当代的或一个国家的人口、资源、环境与发展的协调，还涉及同后代的和国家或地区之间的人口、资源、环境与发展之间矛盾的冲突。

可持续发展是一个涉及经济、社会、文化、技术及自然环境的综合概念。可持续发展主要包括自然资源与生态环境的可持续发展、经济的可持续发展和社会的可持续发展这三个方面。可持续发展一是以自然资源的可持续利用和良好的生态环境为基础；二是以经济的可持续发展为前提；三是以谋求社会的全面进步为目标。只要社会在每一个时

间段内都能保持资源、经济、社会同环境的协调，那么，这个社会的发展就符合可持续发展的要求。人类的最终目标是在供求平衡条件下的可持续发展。可持续发展不仅是经济问题，也不仅是社会问题和生态环境问题，而是三者互相影响的综合体。往往是经济学家强调保持和提高人类生活水平，生态学家呼吁人们重视生态系统的适宜性及其功能的保持，社会学家则将他们的注意力集中于社会和文化的多样性。

可持续发展也是一个动态概念。可持续发展并不是要求某一种经济活动永远运行下去，而是要求不断地进行内部和外部的变革，即利用现行经济活动剩余利润中的适当部分再投资于其他生产活动，而不是被盲目地消耗掉。

（二）不同学者对可持续发展内涵的理解

王宏广认为，可持续发展的基本内涵是：增长不等于发展，发展不等于可持续，可持续发展不等于供求平衡。张坤民认为，可持续发展把发展与环境作为一个有机的整体。可持续发展的基本内涵有五方面：一是可持续发展不可否定经济增长，尤其是穷国的经济增长，但需要重新审视如何推动和实现经济增长；二是可持续发展要求以自然资产为基础，同环境承载能力相协调；三是可持续发展以提高生活质量为目标，同社会进步相适应；四是可持续发展承认并要求产品和服务在价格中体现出自然资源的价值；五是可持续发展的实施以适宜的政策和法律体系为条件，强调“综合决策”和“公众参与”。刘东辉认为，从思想实质看，可持续发展包括三个方面的含义：一是人与自然界的共同进化思想；二是当代与后代兼顾的伦理思想；三是效率与公平目标兼容的思想。换言之，这种发展不能只求眼前利益而损害长期发展的基础，必须近期效益与长期效益兼顾，绝不能“吃祖宗饭，断子孙路”。

Brookfield 于 1991 年指出，可持续发展的本质是运用资源保育原理，增强资源的再生能力，引导技术变革使可再生资源替代不可再生资源成为可能，使资源利用趋于合理化。

从根本上说可持续发展包括了三个概念：一是需要，发展目标是满足人类需要；二 是限制，社会组织、技术状况对环境能力施加限制，限制因素为人口数、环境、资源，即生命系统；三是平等，当今世界，不同地区，不同人群之间的平等。

二、可持续发展的基本原则

（一）公平性原则

所谓公平(fairness)是指机会选择的平等性。可持续发展强调发展应该追求三方面的公平：一是本代人的公平即代内之间的横向公平。可持续发展要满足所有人的需求，给他们机会以满足他们要求过美好生活的愿望。当今世界贫富悬殊、两极分化的状况完全不符合可持续发展的原则。因此，要给世界各国以平等的发展权、公平的资源使用权，要在可持续发展的进程中消除贫困。各国拥有按其本国的环境与政策开发本国自然资源

的主权，并负有确保在其管辖范围内或在其控制下的活动，不至于损害其他国家或在各国管理范围以外地区的环境责任。二是代际间的公平即世代的纵向公平。人类赖以生存的自然资源是有限的，当代人不能因为自己的发展与需求而损害后代人满足其发展需求的条件——自然资源与生态环境，要给后代人以公平利用自然资源的权利。三是公平分配有限资源。目前的现实是，占全球人口 26%的发达国家消耗的能源、钢铁和纸张等占全球的 80%。联合国环境与发展大会通过的《关于环境与发展的里约热内卢宣言》，已把这一原则上升为国家间的主权原则，“各国拥有按其本国的资源与环境发展政策开发本国自然资源的主权，并负有确保在其管辖范围内或控制下的活动不致损害其他国家或在各国管辖范围之外的地区的环境的责任”。

(二) 持续性原则

持续性(sustainability)原则的核心是指人类的经济建设和社会发展不能超过自然资源与生态环境的承载能力。自然资源与生态环境是人类生存与发展的基础和条件，离开了这一基础和条件，人类的生存和发展就无从谈起。因此，自然资源的永续利用和生态环境的可持续性是可持续发展的重要保证。人类发展必须以不损害支持地球生命的大气、水、土壤、生物等自然条件为前提，必须充分考虑自然资源的临界性，必须适应自然资源与生态环境的承载能力。换言之，人类在经济发展过程中，需要根据持续性原则调整自己的生活方式，确定自身的消耗标准，而不是盲目地、过度地生产、消费。发展一旦破坏了人类生存的物质基础，发展本身也就衰退了。

(三) 共同性原则

可持续发展关系到全球的发展。尽管不同国家的历史、经济、文化和发展水平不同，可持续发展的具体目标、政策和实施步骤也各有差异，但公平性和可持续性则是一致的。并且，要实现可持续发展的总目标，必须争取全球共同的配合行动。这是由地球整体性和相互依存性所决定的。因此，致力于达成既尊重各方的利益，又保护全球环境与发展体系的国际协定至关重要。正如《我们共同的未来》中写到“今天我们最紧迫的任务也许是要说服各国，认识回到多边主义的必要性”，“进一步发展共同的认识和共同的责任感，是这个分裂的世界十分需要的”。这就是说，实现可持续发展就是人类要共同促进自身之间、自身与自然之间的协调，这是人类共同的道义和责任。

(四) 需求性原则

传统发展模式以传统经济学为支柱，追求的目标是经济增长(主要是通过国内生产总值 GDP 来反映)。它忽略了资源的代际配置，根据市场信息来刺激当代人的生产活动。这种发展模式不仅使世界资源、环境承受着前所未有的压力而不断恶化，而且使人类的一些基本物质需求(need)仍然得不到满足。而可持续发展则坚持公平性和长期的

可持续性，满足所有人的基本需求，向所有的人提供实现美好生活的机会。

三、可持续发展的战略目标与行动纲领

（一）可持续发展的战略目标

《我们共同的未来》提出，可持续发展旨在保护生态持续性，经济持续性和社会持续性。强调各社会经济因素与生态环境之间的联系和协调。寻求人口、经济、社会、资源、生态、环境等各要素之间的协调发展。《21 世纪议程》更加明确地指出，可持续发展是：改变单纯追求经济增长，忽略生态环境保护的传统发展模式，由资源型经济过渡到技术型经济，综合考虑经济、社会、资源、生态和环境效益；通过产业结构的调整和合理布局，开发和应用高新技术，实现清洁生产和文明消费；提高资源和能源使用效率，减少废物排放等措施，协调生态环境与发展之间的关系，使社会经济发展既满足当代人的需求，又不至于对后代人的需求构成危害，最终达到社会、经济、生态的持续稳定协调发展。

（二）可持续发展的行动纲领

1. 转变发展模式

实施可持续发展意味着一个国家或地区的经济发展和社会发展进程要从现在正在运行的传统模式转变到一个变化很大的新的发展模式中去。对任何一个国家或地区来说， 这种转变是一件非同小可的重大决策，其决策者必须包括掌握国家或地区最高权利的政治家们，而不仅仅是环境保护部门和经济工作部门的领导者。可持续发展的实施是一项综合的系统工程，只有生态学家、经济学家、社会学家、政治家和全体公民共同参与、一起努力，才能从根本上实现可持续发展。

2. 坚持 3R 原则

要实现从高消耗、高排放的传统工业社会向可持续发展社会的转型，需要从生产到消费、从生活到休闲、从个人到社会的各个领域倡导新的行为规范和准则。3R 原则就是把可持续发展的战略思想落实到实际操作层面的具体表现。3R 原则是减量(reduce)化原则、再利用(reuse)原则、再循环(recycle)原则的简称。

1) 减量化原则。减量化原则要求用较少的原材料和能源投入来达到既定的经济目的或生活目的，从而在经济活动的源头就注意节约资源和减少污染。该原则要求产品的设计与生产达到体积小型化、重量轻型化、包装简洁化。比如美国的化妆品过去一直由于包装简单比不上欧洲而受到排斥，但在可持续发展的现在却成了可持续设计的典范而受到赞赏。

2) 再利用原则。再利用原则要求制造产品和包装容器能够以初始的形式被多次反复使用，而不是用过一次就了结。在一个可持续发展的社会，生产者应该将制品及其包

装当作一种日常生活器具来设计，比如向餐桌一样可以被反复利用。

3) 再循环原则。再循环原则就是使物品在完成其使用功能后重新变成资源而不是不可恢复的垃圾。在此原则下，生产者的一个重要任务就是解决废制品的处理问题。按照可持续发展的思想，使一件制品诞生的生产设计只算是完成了一半工作，关键的是要提供制品使用完后如何处理的设计。比如，惠普打印机在使用寿命结束后，极易肢解成若干零部件，可以被再循环利用。

3. 实施《21 世纪议程》

如何实施可持续发展，全球范围内的主要参照方案是 UNCED 通过的《21 世纪议程》。这是集中了全球一批杰出科学家和政治家反复研究并通过谈判达成一致的文件，此外，并无一个广泛适用的标准。对发展中国家的乡村水平，可持续发展意味着首先通过教育、开发和医疗服务解决贫困和疾病、人口政策与妇女权利。对工业化国家的管理者，可持续发展意味着通过经济刺激或污染源控制削减温室气体的排放和控制酸雨成因的污染物排放。

各国实施可持续发展的政策主要包括：限制人口增长、鼓励自然保护、改善生态环境、保护生物多样性、探求资源的永续利用、提高资源利用率、推行清洁生产、推行环境标志、采取源头控制、采取经济手段、增加环保投人、控制城市化进程等，正确的人口政策、经济政策和环境政策对可持续发展具有重要意义。

4. 建立全球伙伴关系

为了保护人类共同生存的地球，实现可持续发展，有必要建立真正的全球伙伴关系。为此，首先要坚持 UNCED 所一致明确的世界各国对于保护地球“共同的但有区别的”责任的原则。鉴于历史的责任和现实的情况，发达国家应承担主要责任。其次，必须采取实际的行动，尽快扭转目前发达国家对发展中国家资金援助和技术转让进展甚微的局面。再次，有必要建立新的、公正的、平等的国际政治、经济新秩序。

四、可持续发展的能力建设

可持续发展能力建设(capacity building)是指支持和实现可持续发展应具有的能力的培养和建设。它是可持续发展目标得以实现的必要保证，包括决策、管理、法制、政策、科技、教育、人力资源、公众参与、国际合作等内容。

(一) 可持续发展的管理体系

实现可持续发展需要一个非常有效的管理体系。事实证明，环境与发展不协调的许多问题是由于决策不当造成的，因此提高决策与管理能力构成了可持续发展能力建设的重要内容。可持续发展管理体系要求培养高素质的决策与管理人员，综合运用规划、法制、行政、经济等手段，建立和完善可持续发展的组织结构，形成综合决策与协调管理的机制。

(二) 可持续发展的法制体制

与可持续发展有关的立法是保障可持续发展战略得以实现的重要手段，因此可持续发展的法制体系建设也是可持续发展能力建设的重要内容。可持续发展要求通过法制体系的建立与实施，实现自然资源的合理利用，使生态破坏与环境污染得以控制，确保社会、经济的可持续发展。

(三) 可持续发展的科技体系

科学技术是可持续发展的支撑体系，没有高水平的科学技术支持，可持续发展的目标就难以实现。科学技术对可持续发展的作用是多方面的。它可以有效地为可持续发展的决策提供依据和手段，促进可持续发展管理水平的提高，加强人类对人与自然关系的理解，提高自然资源利用率和经济效益，提供保护生态环境和控制污染的有效手段。

(四) 可持续发展的教育体系

可持续发展要求人们具有可持续发展的观念和专业技术能力，拥有参与可持续发展的使命感，这就要求在可持续发展的能力建设中注重可持续发展的教育体系建设，使人们在获得可持续发展的科学技术知识的同时，具备可持续发展的道德水平。

(五) 可持续发展的公众参与

公众参与是实现可持续发展的必要保证，因而也是可持续发展能力建设的主要内容。这是因为没有公众的认同、支持和参与，可持续发展的目标和行动无法实现。公众对可持续发展的参与应是广泛的和全面的，不但要参与有关环境与发展的决策，尤其是那些可能影响到他们工作和生活的决策，而且更要参与对决策的执行过程的监督。

(六) 国 际 合 作

可持续发展作为全球发展的总目标，它的实现，必须采取全球共同的联合行动。通过加强国际间的合作与交流，不断增强国际协作力，以求不仅在一国而且在全球范围内真正实现可持续发展。

五、可持续发展的框架

世界银行对可持续发展的社会、经济和生态环境之间的相互关系，表达为如图 18-1 所示的框架。

对于不同的系统，发展所追求的目标是不同的。对于单纯的经济系统而言，发展的

目标是经济总量的持续增加，资金的投入和效益的最大化；对于社会系统而言，发展的目标是追求社会平等，包括广大公众参与，社会流动性加大以满足不同需求的人做出最佳选择，每个人都有权做出自己的选择；对于生态系统而言，发展的目标是追求生态系统的整体性，要在生态系统的承载能力下，合理利用资源，保护生物多样性，在可持续发展的框架下，这三个子系统要相互协调，强调子系统之间的相互联系、相互影响和相互促进，从而达到社会、经济与生态环境的协调和可持续发展。

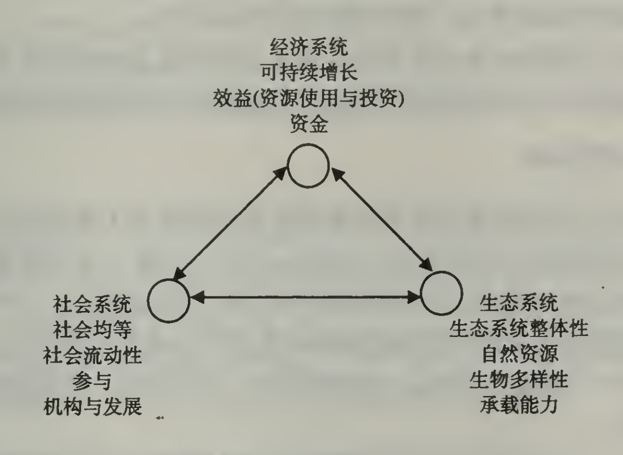


图 18-1　可持续发展的框架

第三节　可持续生态系统

一、可持续生态系统的基本原理

（一）可持续生态系统的概念

可持续生态系统是指稳定、健康和良性运作的地球生态系统。该系统既可为当代人提供足够的生产生活资源，又可为后代人提供其所需的生产生活资源；既可为当代人提供适宜的生态环境，又不威胁后代人的生存空间；使退化的生态系统恢复到良好状态，使良性生态系统不断进化、不断完善，发挥其最大功能，为人类服务。

可持续生态系统的组成成分与一般生态系统相同，由两部分或四个基本成分组成，即生物和非生物部分或生产者、消费者、还原者和非生物的环境组成。这些基本成分，在能量流动和物质循环中各以其特有的作用而相互影响，互为依存，通过复杂的营养关系而紧密地结合为一个统一整体，使系统得以良性运行。

(二) 可持续生态系统的结构和功能

1. 可持续生态系统的结构

可持续生态系统的结构是指构成可持续生态系统的要素及其时空分布和物质、能量循环转移的路径，包括形态结构和营养结构。

1) 形态结构。可持续生态系统的生物种类、种群数量、种群的空间结构(水平结构、垂直结构)和时间结构(发育、季相)等构成其形态结构。

2) 营养结构。可持续生态系统各组成成分之间建立起来的营养关系(食物链或食物网)，构成其营养结构。它是可持续生态系统中能量流动和物质循环的基础(见第二章)。

2. 可持续生态系统的功能

1) 物质循环。可持续生态系统的物质循环是指物质由无机环境(大气圈、水圈、岩石圈)进入到生物有机体，经过生长、代谢、死亡、分解，又重新返回到环境中的过程。物质循环的动力来自能量；物质是能量的载体，保证能量从一种形式转变为另一种形式。因此，在可持续生态系统中物质循环和能量流动是紧密相连的。可持续生态系统的物质循环是一个十分复杂的过程，包括水循环、气体循环、沉积循环、工农业生产循环等四种主要类型。

2) 能量流动。可持续生态系统的能量流动是指能量通过食物网络在系统内的传递和耗散过程。可持续生态系统的能量来自于太阳能。它通过绿色植物光合作用获取太阳能，并把太阳能转化为化学能，贮存在有机体中。此后，随着植物被动物逐级消费，能量也就沿着食物链而逐级流动。

3) 信息传递。在可持续生态系统的各组成部分之间及其各组分内部，存在着各种形式的信息，以此把系统联系成为一个有机整体。可持续生态系统的信息形式，主要包括营养信息、化学信息、物理信息、行为信息、人类信息等，它们对系统的调节具有重要作用。整个可持续生态系统物质流和能量流的行为是由信息决定的，而信息又存在于物质流和能量流之中，它们是信息的载体。

(三) 可持续生态系统的特征

1. 整体性

可持续生态系统是在自然生态系统的基础上，经过人类加工改造形成的更适合人类生存和发展的地球生态系统，它是由自然、经济、社会三部分交织而成的有机整体。其中，组成可持续生态系统的各要素和各部分相互联系、相互制约，形成稳定的网络结构系统，使可持续生态系统的整体结构和功能最优、处于良性循环状态。

2. 开放性

可持续生态系统是开放的系统，与周围环境有着千丝万缕的联系。人类可以通过调控作用，增大对系统的物质和能量输入，改善系统的结构，增强系统的服务功能，促进

系统的可持续发展。

3. 健康、稳定和可持续性

可持续生态系统是人类在可持续发展思想指导下，通过人为调控和科学管理而形成的健康和良性循环的地球生态系统，具有发展的稳定性和可持续性特征。

4. 承载能力有限性

可持续生态系统的承载能力是有限的，它所能提供的资源和容纳的污染物只能维持在最大生态承载力，即环境容量阈值范围内。因此，对自然资源的开发利用和污染物的排放，必须与环境容量相适应。否则，就会导致系统受损、退化，甚至崩溃。

5. 生态服务性

可持续生态系统是一个具有很强生态服务功能的功能单元，它在持续不断的物质循环和能量流动过程中，为人类提供着多种直接或间接的服务。比如为人类提供必不可少的粮食、药物、工农业原料等生态系统产品、人类生存环境等直接服务，同时也提供产生和维持生物多样性、调节气候、减缓洪涝等自然灾害、维持土壤功能、传播花粉、有害生物控制、接纳废物、净化与美化环境等大量间接功益性服务。

(四) 可持续生态系统的稳态

可持续生态系统是结构相对稳定，物质的输入、输出接近相等，生产过程和消费、分解过程大体平衡的正常运行生态系统，这种状态称为可持续生态系统的稳态。

可持续生态系统的稳态并不是静止的，而是处于不断发展变化之中的相对稳定，它取决于可持续生态系统的自我维持和调节功能。由于生态系统的自我调节能力是有限的，当外界干扰超过系统自身调节能力的限度，调节就不起作用甚至失效，以致系统无法通过自我调节来恢复其相对稳定状态，并导致系统结构破坏、功能受阻、反馈能力下降等，这种状态称为生态平衡失调。主要表现在系统结构缺损、结构变化、能量流动受阻和物质循环中断等方面。因此，为了使可持续生态系统更好地发挥其最大服务功能，保持其稳态和良性运行，人类对系统的调控必须适度。

二、可持续生态系统遵循的基本规律

(一) 相互依存与制约规律

在可持续生态系统中，不仅同种生物相互依存、相互制约，异种生物(系统内各部分)之间也相互依存、相互制约。不同群落之间，生物与环境、人类之间都普遍存在既相互依存、又相互制约的关系。正是由于生物之间、生物与环境及人类之间的这种既相互依存，又相互制约的生命联系，才使可持续生态系统成为环环紧扣、牵一发而动全身

的有机整体。

（二）物质循环与再生规律

能量流动和物质循环是生态系统运行的源泉。生物通过同化与异化作用，不断与外界进行着物质和能量的交换，把自然界的物质转化为自己身体的一部分，又把自身的物质分解还原为自然界之物质，再次进入物质循环，重新为生物所利用，由此形成生生不息的物质循环。

（三）物质输入和输出动态平衡规律

可持续生态系统作为稳定的生态系统，无论是生物、环境，还是整个生态系统，物质的输入与输出总是基本平衡的。因此，人类在开发利用自然资源的时候，要注意保持整个生态系统的输入与输出的平衡，以发挥系统的最大生态服务功能，即人类从自然界中取走多少，就应该相应的补充多少，以保持系统的稳态和持续性。

（四）协同进化规律

生物之间、生物与环境之间的对立统一关系，是一种相互适应与协同进化关系，而不是你死我活的绝对对立关系。生物适应环境而又改造环境，这是生物与环境之间的协同进化；生物与生物之间相生相克、互惠互利、共同存亡，这是生物之间的协调进化。

（五）最大阈限规律

在一定限度内，可持续生态系统可以忍受一定的外界压力，并通过自我调节机制使其保持或恢复稳态，超出这一限度，可持续生态系统的自我调节机制就会降低或消失，系统的稳态就要遭到破坏，甚至导致整个可持续生态系统的崩溃。这个限度，就是生态阈限，超出了系统可以忍受的最大阈限，可持续生态系统就会失去稳定状态，这就是可持续生态系统稳态的最大阈限规律。

三、可持续生态系统评价

可持续生态系统，在空间上是稳定和健康的，在时间上能够维持系统的组织结构和自治，也能够维持对胁迫的恢复力。因此，可持续生态系统的评价重点是生态系统的健康评价。

（一）生态系统健康的概念

生态系统健康(ecosystem health)是指生态系统具有的活力、稳定和自我调节的能力。换言之，当一个生态系统的生物群落在结构、功能上与理论上所描述的相近，它就是健康的，否则就是不健康。

（二）生态系统健康的评价

生态系统健康与可持续性评价可从活力、组织和恢复力三个主要特征来衡量。

1. 活力

活力(vigor)，即生态系统的能量输入和营养循环容量，具体指标为生态系统的初级生产力和物质循环。在一定范围内生态系统的能量输入越多，物质循环越快，活力就越高。但这并不意味着可以无限制地输入能量和物质，来提高系统活力。超过系统的生态阈限，系统就会丧失活力。

活力及其活性、代谢和初级生产力，是衡量生态系统健康与可持续主要指标中最易测量的部分，可用初级生产力和经济系统内单位时间的货币流通量来表示。Ulanowicz提出用网络分析(network analysis)方法进行预测的两种数量方法，即计算系统的总产量(P_{ts})和净输入(I_n)。P_{ts} 是在单位时间内沿着各个体的交换途径物质转移量的简单相加($P_{ts}=\sum T_{ij}$)，而 I_n 则可以直接从 P_{ts} 中分离出来。

2. 恢复力

恢复力(resilience)，即胁迫消失时，系统克服压力及反弹回复的容量。具体指标为自然干扰的恢复速率和生态系统对自然干扰的抵抗力。一般认为，受胁迫生态系统比不受胁迫生态系统的恢复力更小。

恢复力是生态系统维持结构与格局的能力，预测生态系统在胁迫下的动态过程一般要求用计算机模型，比如林窗动态模型(如 GAP)、生物地球化学模型(如 CENTURY)等。通过这些模型可估算出恢复时间(RT)及该生态系统可以承受的最大胁迫(MS，当生态系统从一种状态转化为另一种状态的临界值)。恢复力即为 MS/RT。

3. 组织

组织(organization)，即系统的复杂性，这一特征会随生态系统的次生演替而发生变化和作用。具体指标为生态系统中 r-对策种与 k-对策种的比率，短命种与长命种的比率，外来种与乡土种的比率，共生程度，乡土种的消亡度等。一般认为，生态系统组织越复杂就越健康，可持续性就越强。

系统的复杂性是指生态系统组成及途径的多样性，在生态系统演替和进化过程中，在没有胁迫的情况下，生态系统的物质和能量运转量会增加，但其基本反馈结构会保持稳定。在胁迫下，一个组分的活力增加或减少，会引起其他组分的增加或减少，并通过

各种循环最终影响到系统自身。

Ulanowicz 根据这些特征及网络分析方法建立了组织测量及预测方程。首先建立一个矩阵，矩阵中每个元素 T_{ij} 表示 i 行成分到 j 列成分间物质与能量的交换。状态 $P(a_i, b_j)$指一个中间变量离开成分 i 并进入成分 $j(T_{ij})$的概率，由于 T 在这样的系统运移中是收敛的，就可以通过 T_{ij}/T 估算 $P(a_i, b_j)$，同样 $P(b_j)$一部分进入元素 j 的概率也可以通过 T_j/T 估算，最后，一部分在离开了 i 进入 j 的量的条件概率 $P(b_j, T_{ai})$可通过 $T_{ij}/(T_i)$估算。因此，生态系统的组织测定公式为

$$I = T_{ij}/T \times \log(T_{ij} \times T/T_j \times T_i)$$

此外，Ulanowicz 还建立了自主权值(A)和系统不确定性(H)公式，以从其他两个方面量化组织。

$$A = T \times I = T_{ij} \times \log(T_{ij} \times T/T_j \times T_i)$$

$$H = (T_{ij}/T) \times \log(T_{ij}/T)$$

根据上述活力、恢复力和组织三项指标，可归纳出生态系统健康指数(health index，I_h)来判断系统是否健康与可持续。表达式为

$$I_h = V \times O \times R$$

式中：I_h 为系统健康指数，也是可持续性指数；V 为活力指数，是系统新陈代谢和初级生产力的主要标准；O 为组织指数，为系统组织的相对程度 0~1 间的指数；R 为恢复力，是系统恢复力的相对程度 0~1 间的指数。

四、生态系统对环境胁迫的反应

各种逆境对生态系统的胁迫机理不一，有时是单因子胁迫，有时是多因子胁迫。

(一) 单因子胁迫下的反应

据 Rapport(1998)研究，不同生态系统在同种胁迫下的反映类似(表 18-1)。此外，Odum(1985)提出了受胁迫生态系统的反应趋势，他认为生态系统在胁迫情况下会在能量(群落呼吸增加，生产力/呼吸量＜1 或＞1，生产力/生物量增加，辅助能量的重要性增加，冗余的初级生产力增加)、物质循环(物质流通率增加，物质的水平运移增加而垂直循环降低，群落的营养损失增加)、群落结构(r-对策种的比例增加，生物的大小减少，生物的寿命或部分器官寿命缩短，食物链变短，物种多样性降低)和一般系统水平(生态系统变得更开放，自然演替逆行，资源利用率变低，寄生现象增加而互生现象降低，生态系统功能比结构更强壮)上发生变化。

表 18-1　在胁迫下生态系统的表现

指标	低拉文田大湖	开容九开河	琼拿塔山地
系统性质			
初级生产力	+	+	0/–
水平营养运移	+	+	+
物种多样性	–	–	– /+
疾病普遍性	+	+	+
种群调节	–	–	–
演替的逆转	+	+	+
复合稳定性	–	–	–
群落结构			
r-对策种	+	+	+
短命种	+	+	+
更小的生物群	+	+	?
外来种	+	+	+
种间相互作用	–	–	–
边界线	+	+	+
乡土种的消失	?	+	+

注：+ 增加；– 减少；0 无变化；？不清楚。

据 Rapport　1998

（二）多因子胁迫下的反应

当生态系统受多个因子胁迫时会产生累积效应，从而增加生态系统的变异程度。在这种情况下，生态系统的反应与胁迫因子的关系非常复杂，而且对人类的管理也提出了更高的要求。Rapport(1998)曾提出一个框图展示了人类活动对生态系统变化及人类健康的影响(图 18-2)。图 18-2 表明，人类活动会胁迫生态系统健康，导致生态系统结构发生变化，进而影响到生态系统的服务功能，对人类健康产生影响。

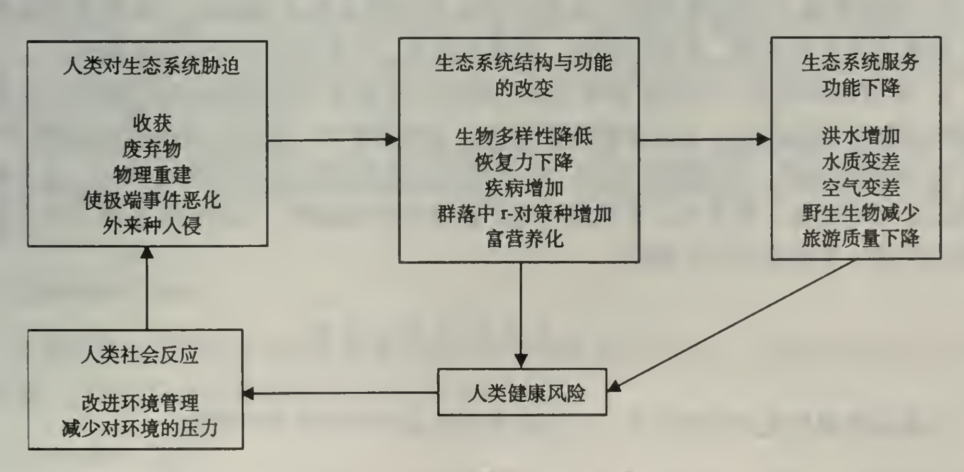


图 18-2　人类活动与生态系统健康间的关系(据 Rapport　1998)

（三）生态系统对胁迫的反应过程与结果

在外界因子的作用下，在可承受范围内，生态系统的反应过程分三个阶段：开始时为初期反应，随后是抵抗与恢复阶段，最后是恢复阶段(Begon 1990)。

生态系统对胁迫的反应有死亡(即偏离原轨道并消亡)、退化(偏离原轨道)、恢复(即恢复到原状态及其附近)、进入更佳状态四种结果。

五、生态系统退化

（一）生态系统退化的概念

生态系统退化(ecosystem degradation)，是指生态系统在自然或人为干扰下偏离自然状态而发生逆行演替，造成系统结构破坏、功能丧失或衰退、稳定性和生产力降低、抗逆能力减弱等一系列生态环境恶化现象。

（二）生态系统退化的表现

生态系统从一个稳定状态演替到不稳定的退化状态，它的系统组成、结构、能量和物质循环总量与效率、生物多样性等方面均发生了量或质的变化，与正常演替的生态系统相比，生态系统退化主要表现在以下几方面：

1) 结构失衡。在系统结构方面，退化生态系统的种类组成、群落或系统结构改变，生物多样性、结构多样性和空间异质性降低，系统组成不稳定，生物间的相互关系改变(Chapman 1992，Daily 1995)，一些物种丧失或优势种、建群种的优势度降低。

2) 功能衰退。在能量方面，退化生态系统的能量转化量降低，系统储存的能量低，能量交换水平下降，食物链缩短、多呈直线状，而不同于正常的环形循环。

3) 物质循环受阻。在物质循环方面，退化生态系统中的总有机质存储少，生产者子系统的物质积累降低，无机营养物质多储存于环境库中，而较少地储存于生物库中。

4) 稳定性减低。在稳定性方面，由于退化生态系统的组成和结构单一，生态联系和生态学过程简化，退化生态系统对外界干扰显得较为敏感，系统的抗逆能力和自我恢复能力较低，系统变的十分脆弱。

（三）生态系统退化的原因

生态系统退化是在自然因素、人为因素或两者共同作用下产生的。

1. 自然因素

在生态系统中，无论是生产者、消费者、还原者，还是各个子系统，它们的生存和

生命活动与栖息地的土壤质地、温度、降水等自然因素密切相关。自然因素的变化，比如侵蚀、火山、火灾、地震、干旱、洪涝等自然灾害和外来种入侵(包括人为引种后泛滥成灾的入侵)等，极易引起生态系统受损或退化，给生态系统造成巨大危害。但是，由于自然灾害发生是断续的，因而对生态系统的危害只涉及灾害发生的地区，影响远不及人为干扰对生态系统的破坏严重。

2. 人为干扰

人类是生态系统中最活跃、最积极的因素。随着科技进步和社会发展，人类对自然界的干扰越来越强，对加速生态系统退化具有不可推卸的责任。比如乱砍滥伐、乱垦滥挖、过度捕捞、围湖造田、破坏湿地、污染环境、滥用化肥与杀虫剂、战争与火灾等严重影响生态系统的稳态，导致生态系统退化。据 1995 年 Daily 对造成生态系统退化的人类活动的排序分析，过度开发(含直接破坏和环境污染等)占 35%，毁林占 30%，农业活动占 28%，过度收获薪材占 7%，生物工业占 1%。

生态系统退化的过程或程度取决于生态系统结构或过程受干扰的程度。一般地，在生态系统组分尚未完全破坏前排除干扰，生态系统的退化会停止并开始恢复，比如少量砍伐后森林的恢复，但在生态系统的功能过程被破坏后排除干扰，生态系统的退化很难停止，而且有可能会加剧。

六、生态系统恢复与重建

(一) 生态恢复概述

1. 生态恢复的概念

生态恢复(ecological restoration)，是指依据生态学原理，利用生物技术和工程技术，通过恢复、修复、改良、更新、改造、重建受损或退化生态系统和土地，恢复生态系统的功能，提高土地生产潜力的过程。换言之，生态恢复是指使生态系统恢复到或接近于它受干扰前的状态的管理与操作过程，即重建该系统干扰前的结构与功能及有关的物理学和生物学特征(Cairns 1992)。

生态恢复分狭义的恢复与广义的恢复两种概念。狭义的生态恢复即严格意义上的整个生态系统即结构、过程甚至所有物种的恢复。广义的生态恢复即人类社会需求意义上的恢复。

2. 生态恢复的目的

生态恢复的目的是提高生态系统的生产力或服务功能，保护、改善和恢复良好的生态环境，为社会经济发展提供持续的资源和环境基础。

3. 生态恢复的目标

根据不同的社会、经济、文化与生活需要，人们往往对不同的退化生态系统制定不

同水平的发展目标。但无论对什么类型的退化生态系统，都应达到几个基本目标。

1) 实现生态系统的本底的稳定性。本底(地质地貌)是生态系统发育与存在的载体，基底不稳定(比如滑坡、下沉等)就不可能保证生态系统的持续演替与发展。

2) 恢复植被和土壤。恢复植被和土壤，保证一定的植被覆盖率和土壤肥力。

3) 增加种类组成和生物多样性。

4) 实现生物群落的恢复。实现生物群落的恢复，提高生态系统的生产力和自我维持能力。

5) 减少或控制环境污染。

6) 增加视觉和美学享受。

(二) 生态系统恢复与重建的基本原则

退化生态系统的恢复与重建要求在遵循自然规律的基础上，根据技术适当、经济可行、社会可接受的原则，通过人为作用，对受损或退化生态系统进行重构或再生的过程，以使受损或退化生态系统重新获得健康并有益于人类生存与发展。生态恢复与重建的原则，一般包括自然法则、社会经济技术原则、美学原则 3 个方面(图 18-3)。

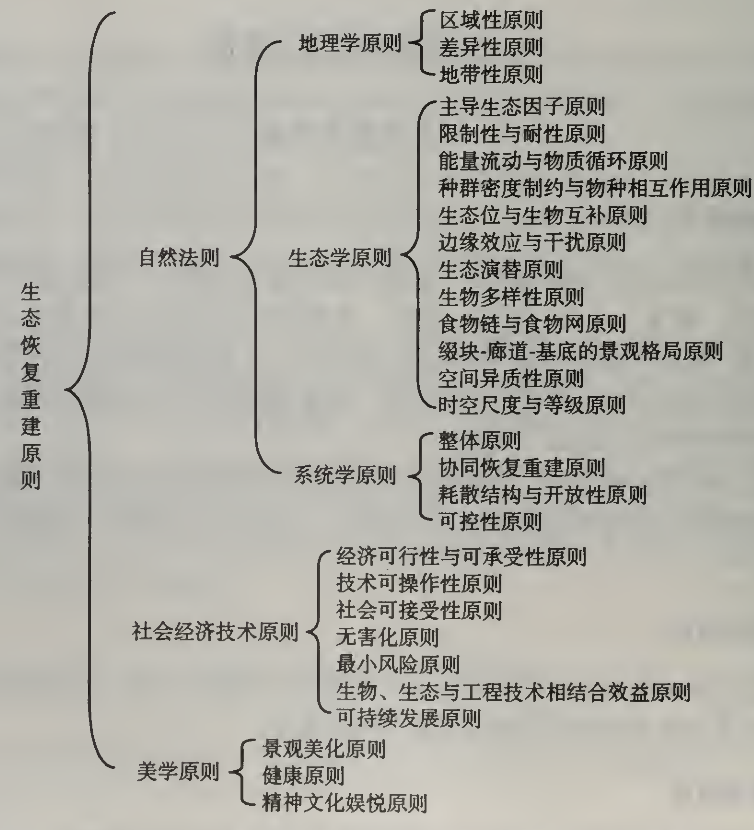


图 18-3　退化生态系统恢复与重建的基本定律、原理和原则

有关退化生态系统恢复与重建的技术和程序请参考第十一章。

（三）生态恢复成功的标准

通常，生态恢复成功的标准是将恢复后的生态系统与未受干扰的生态系统进行比较，包括关键种的多度及表现、重要生态过程的再建、水文过程等非生物特征的恢复。目前，对生态恢复成功的标准不统一，存在多种认识。比如国际恢复学会建议比较恢复系统与参照系统的生物多样性、群落结构、生态系统功能、干扰体系及非生物的生态服务功能。也有人提出采用生态系统 23 个重要特征来量化整个生态系统随时间在结构、组成及功能复杂性方面的变化。Cains(1997)认为恢复至少包括被公众社会感觉到的，并被确认恢复到可用程度，恢复到初始的结构和功能条件(尽管组成这个结构的元素可能与初始状况明显不同)。Bradshaw(1987)提出用可持续性(可自然更新)、不可入侵性、生产力(与自然群落一样高)、营养保持力、生物间相互作用这五个标准来判断生态恢复。Lamd(1994)认为恢复成功与否的指标体系应包括造林产量指标(幼苗成活率、幼苗高度、基径和蓄材生长、种植密度、病虫害受控情况)、生态指标(期望物种的出现情况、适当的动植物多样性、自然更新能否发生、有适量的固氮树种、目标种出现否、适当的植物覆盖率、土壤表面稳定性、土壤有机质含量高、地表水和地下水保持)和社会经济指标(当地人口稳定、物价稳定、食物和能源供应充足、农林业平衡、从恢复中得到经济效益与支出平衡、对肥料和除草剂的需求)。Davis(1996)和 Margaret(1997)等认为恢复是指系统的结构和功能恢复到接近其受干扰前的结构和功能，结构恢复指标是乡土种的丰富度，而功能恢复指标包括初级与次级生产力、食物网结构、在物种组成与生态系统过程中存在反馈(即恢复所期望物种的丰富度)管理群落结构的发展和确认群落结构与功能间的联结已形成。Costanza 等(1998)在评价生态系统健康状况时提出的一些指标(活力、恢复力等)，也可用于生态系统恢复的评估。在生态系统恢复的过程中，还可用景观生态学中的预测模型为恢复成功提供参考。此外，判断成功恢复还需在一定尺度下，用动态的观点，分阶段检验(Whisenant and Tongway 1995)。退化生态系统恢复的最终目标是恢复和维持生态系统的服务功能(ecosystem service)，即生态系统为人类提供的直接或间接利益，使其更好地发挥为人类的生存和发展服务的功能。

（四）生态恢复的价值

生态恢复不仅具有实际的经济价值，同时还具有巨大但不为人所熟知的生态价值。生态恢复成本取决于恢复范围的大小、退化的程度、恢复的目标、原材料的可利用性以及技术的难点等。比如中国以垦殖为目标建设的生产性土地，其成本达到 950~1900 美元/hm^2，而年均产值仅 150 美元/hm^2(Edmards and Abirardi 1990)。通常生态恢复所耗费的成本往往超过恢复后土地利用的金融价值，从经济学的角度看生态恢复似乎是不经济。但我们不能仅仅以土地本身的直接经济价值来衡量恢复后的社会经济和生态价值，而应以发展的眼光，充分认识生态恢复后产生的巨大社会、经济和生态综

合价值。比如我国科尔沁沙地经过 10 多年的生态恢复与重建，使原来的沙丘区形成了较稠密的沙地灌草植被系统，产草量提高了 1.5~3 倍，流沙面积下降了 2/3，人均纯收入提高了 375%，社会、经济和生态效益显著。

第四节　可持续发展面临的问题

一、土地与耕地问题

地球陆地面积共 148 亿 hm^2，其中约有 14 亿 hm^2 被冰雪覆盖，人类可利用的土地约 134 亿 hm^2，其中耕地占 10.8%，草场占 22.3%，它们与人类的命运休戚相关。但自 20 世纪中叶以来，由于人口过快增加、不合理的土地利用等原因，土地退化、耕地锐减，严重困扰着人类的生存与可持续发展。

(一) 土 地 退 化

不合理的土地利用，比如耕地的过度开发、人为破坏森林和过度放牧等，导致水土流失、土地荒漠化、土地贫瘠化以及盐渍化现象越来越严重。据联合国环境规划署估计，1945~1980 年，全球大约有 12 亿 hm^2 的土地中度到极度退化，其中 900 万 hm^2 的土地属于极度退化(占土地退化面积的 1%)，已无法重新使用和恢复。第二次世界大战以来，全球退化的土地面积已达 19.6 亿 hm^2。土地退化的类型主要有以下三种。

1. 荒漠化

随着人类对自然界影响的日渐加强，荒漠化问题越来越突出。据联合国环境规划署(UNEP)1992 年的现状调查估计，全球 2/3 的国家和地区以及世界陆地面积的 1/3 受到荒漠化的威胁。荒漠化直接威胁着全球 12 亿人，其中 1.35 亿人在短时间内有失去土地的危险。由于荒漠化的影响，全球每年大约丧失 450~580 万 hm^2 的放牧地、350~400 万 hm^2 的旱地和 100~130 万 hm^2 的灌溉土地，造成的经济损失每年高达 423 亿美元。荒漠化还在以每年 600 万 hm^2 的速度扩展，对非洲、亚洲、拉丁美洲等地区的危害非常严重。中国是世界上荒漠化危害范围最广、程度最深的地区之一，荒漠化面积达 26 220 万 hm^2，占国土面积的 27.3%，并以每年 24.6 万 hm^2 的速度扩展，严重威胁着所影响地区居民的正常生产与生活。

2. 水土流失

植被破坏和不合理的土地经营，导致土壤侵蚀日趋严重。据联合国粮农组织估计，全世界每年有 300 多万公顷土地毁于水土流失，流失土壤 270 亿 t。亚洲、非洲和南美洲，每公顷土地每年损失表土 30~40t，北美洲和欧洲每公顷土地每年损失表土 17t。比如中国是世界上水土流失最严重的国家之一。水土流失现象遍布各省(区)，尤以黄土高原和南方丘陵区最为严重。全国水土流失面积达 3.67 亿 hm^2，约占国土面积的 38.2%。每年流失土壤总量达 50 亿 t，相当于全国耕地每年剥去 1cm 的肥土层，损失的

氮、磷、钾养分相当于 4000 万 t 化肥。在严重水土流失地区，地面被切割的支离破碎、沟壑纵横。同时，随水土流失的土壤还造成水库、湖泊和河道淤积等，给土地资源和农业生产带来极大破坏。

3. 积水和盐渍化

灌溉是农业生产的重要保障措施，在许多干旱地区，没有灌溉就没有农业。但不适当的灌溉、不良排水和干旱区高强度的蒸发作用，导致表土盐分积累，正在使许多土地失去耕作价值，成为不毛之地。据估计，在过去的几个世纪中全球已有 2000 万~2500 万 hm^2 的耕地发生次生盐渍化。现在，全世界 2100 万 hm^2 土地积水，生产力下降 20%；2000 万 hm^2 土地受盐渍化危害。每年由于积水和盐渍化而弃耕的土地达 20 万~30 万 hm^2。

(二) 人均耕地急剧下降

由于耕地面积的增长不及人口的增长，所以世界人均耕地面积日益减少。据估计，从现在起到 2025 年，人均耕地将从 $0.26hm^2$ 下降到 $0.17hm^2$。中国是世界上人均耕地最少的国家之一，人均耕地 $0.078hm^2$，不足世界平均值的 1/3。而且随着人口增加和城市化进程加快，人均耕地减少的趋势在所难免，人地矛盾将继续恶化。

二、植被破坏和生物多样性损失问题

(一) 植 被 破 坏

1. 森林砍伐

森林是地球陆地生态系统的支柱，是经济发展和人民生活不可缺少的可更新的自然资源，同时它巨大的生态环境功能更是人类生存和发展所必需的。自 1950 年以来，由于大肆砍伐，全球森林已损失过半，而且毁林规模越来越大。目前，世界上森林每年减少 100 万~200 万 hm^2，其中，热带森林以每年 18 万 hm^2 的速度递减。据推测，到 2040 年地球上除了少部分得到保护的热带雨林外，将不再有热带雨林存在。中国是一个少林的国家，森林覆盖率只有 19.4%，仅为全球平均水平(31.4%)的 61.78%。人均森林面积不足 0.11 hm^2，为世界平均水平的 15.96%，居世界第 121 位。

2. 草场退化

草场包括草原、草地和草山草坡，是自然生态系统的一个重要组成部分。全世界草场面积约 30 亿 hm^2，占全球陆地面积的 22%。草场不仅具有巨大的生产力和经济价值，而且有重要的生态意义。不合理开垦，过度放牧，重用轻养，导致草场退化、土地侵蚀和荒漠化。目前，世界各地草场都有不同程度的退化，尤以发展中国家的草场退化最为严重。我国草场退化面积占可利用草场的 1/3，并呈继续扩展之势，严重影响着畜

牧业生产。

（二）生物多样性减少

生物多样性是大自然经过千百万年进化发展而形成的，它维系着地球生物圈，并由此造就了人类生存和发展的基础条件。虽然物种的形成与灭绝是一个自然过程，但所有这些灭绝过程都是经历了漫长的岁月才完成的。然而近几个世纪以来，由于人口快速增长和人类大规模的生产活动，使生态环境不断遭到破坏而失去平衡，从而加剧了物种灭绝的速度。森林毁灭、湿地和草原破坏是物种消失的直接原因，此外，环境污染、生物种被滥用等，也是物种灭绝的主要原因。据估计，在过去的 6 亿年中，每年灭绝的物种只有几种，而目前每天约消失 50 个物种。全球现有 3956 个物种濒危，3647 个物种易危，7240 个物种珍稀。据专家分析，如果一个生境的面积减少 90%，大约一半的物种就会失去。若以目前的速度砍伐森林，则地球上全部物种的 1/4 在未来 20~30 年内可能有消失的严重危险。

三、水资源问题

水是生命之源，是地球上所有生物生存和发展的必要条件之一，是人类生产生活的命脉。随着社会的迅速发展和人口的急剧增长，人类对水的需求量急剧增加，同时水污染又使水质恶化，水资源危机已严重困扰着人类。

随着人口增长、经济发展和消费水平提高，世界用水量大幅度增加，现在人类每天提取的淡水量 $10km^3$，年均 $3500km^3$，同工业化初期相比增长了 35 倍，特别是近半个世纪淡水提取量以每年 4%~8%的速度递增。这些水资源主要用于三方面，即农业灌溉用水(占 69%)、工业用水(占 23%)、生活用水(占 8%)。目前，全球对水的需求量每 20 年翻一番，水越来越供不应求，出现了严重缺水的局面。全球已有 100 多个国家缺水，其中 40 多个国家严重缺水。据世界卫生组织估算，全世界约有 3/4 的农村人口和 1/5 的城市人口常年得不到足够的淡水供应。中国是世界上严重缺水的国家之一，由于水资源时空分布不均、人均占有水量少、用水浪费以及管理不善等，全国不少地区，尤其是华北、东北和西北地区常常出现水荒，局部地区水荒严重。目前全国有 2.4 亿人口、1.5 亿牲畜饮水困难。

水资源缺乏将带来一系列严重后果，它不仅对生态环境和气候变化产生深远的影响，也使人类的生存和发展受到严重的威胁。比如，水资源枯竭已使很多江河断流、湖泊等湿地萎缩和干涸，导致干旱和荒漠化的进程加快，生物多样性减少等。同时，水资源短缺将可能引起全球水循环模式改变，使水循环失去平衡。

四、环境问题

环境污染是指人为排放的有毒有害物质，破坏了生态平衡，改变了原来生态系统的正常结构与功能，恶化了工农业生产和人类生活环境。污染物质又沿着食物链转移、富

集而后进入人体，危害人类健康。

(一) 大气污染和酸雨危害

大气污染物质包括各种有害气体和尘埃，对城市生态系统及人类健康构成了重大威胁。其中由矿物燃料燃烧产生的硫氧化物(SO_x)和氮氧化物(NO_x)等气体遇雨水可形成酸雨。据估计，全球每年人为排入大气的二氧化硫约 1.5 亿 t，氮氧化物约 1.5 亿 t。在工业化国家，90%的二氧化硫是人类活动所排放的，它主要来自炼油厂、热电厂和冶炼厂等。中国二氧化硫排放量高达 1396 万 t(1996)，酸雨区已覆盖国土面积的 40%，尤以长江以南和四川盆地的酸雨污染最为严重。

(二) 水污染加剧

随着经济发展和人类生活水平提高，大量的生产生活污水被排放到河流等水体中，造成水污染。水污染主要有三种类型：一是由污水排放和土壤侵蚀造成的水体富营养化，发生水华并最终耗尽水中的溶解氧，引起水生生物死亡和水质浑浊或异味。二是随污水排放将病原体引入水体，发生生物性污染。三是工业、采矿和农业活动造成水体重金属和合成有机物污染，而且引入的有毒有害污染物可能在生物体内聚集，甚至沿食物链传递或富集，最终造成人体危害和生态影响。

(三) 固体废弃物猛增

固体废弃物是指被丢弃的固体和泥状物质，包括城市垃圾、工业废物、农业废物、放射性废物以及从废水、废气中分离出来的固体颗粒，简称废物。据统计，全世界每年产生各种固体废弃物约 100 亿 t，其中约 3%~5%为有毒有害的危险废弃物，并且其增加速度在加快。这些固体废弃物对生态环境造成了越来越严重的危害，它们不但需要占用大量的土地堆放，浪费土地资源；而且还通过各种途径污染大气、水体、土壤、生物，并危害人体健康。

(四) 臭 氧 耗 竭

随着人类大量制造和使用气溶胶喷雾器和空调制冷设备，造成大量的氟氯烃(简称CFC)和哈龙等物质的排放，使大气臭氧严重消耗，臭氧层日益稀薄。20 世纪 80 年代以来全球上空的臭氧平均减少了 3%，在中高纬度减少了 5%~10%，并在南极和北极已出现臭氧空洞。臭氧减少使到达地面的紫外辐射 UV-B 的辐射强度增强，致使皮肤癌和白内障发病率增高、植物的光合作用受到抑制、温室效应增强、海水中的浮游生物减少，进而影响到生物链乃至整个生态系统。

五、全球变化问题

全球变化是指由于人类活动而造成的大量温室气体(二氧化碳、甲烷、N_xO 等)向大气排放，从而引起大气中温室气体的浓度不断增高和大气成分的改变，进而导致全球平均气温的增加以及其他气候要素的改变的现象。

随着人口增加和社会生产力的发展，矿物燃料的大量使用和人为排放的氟氯烃等温室气体，大大增加了大气的温室效应。在过去的 100 年中，大气中二氧化碳含量增加了 25%，甲烷增加了 100%，N_xO 增加了 8%，全球气温平均升高了 0.4~0.6℃。据科学家预测，到 21 世纪中叶，大气中二氧化碳的含量将达到 550μg/g 以上，为工业革命前的 2 倍。届时，全球气温将升高 1.5~4.5℃，海平面将升高 30~50cm，许多人口密集的地区，比如太平洋和印度洋上的多数岛屿将被海水淹没。气温升高也将对全球生态环境、社会经济发展产生巨大影响。

六、人 口 问 题

世界人口增长过快的警钟早已鸣响。综观人类历史，人口数量呈现出近乎指数增长的态势。在旧石器时代，世界人口每翻一番需要 3 万年；公元初年缩短到 1000 年左右；19 世纪中期缩短到 150 年。1804 年世界人口首次达到 10 亿；仅过了 123 年后，世界人口就翻了一番，达到了 20 亿；1960 年突破 30 亿；1974 年达到 40 亿；1987 年达到 50 亿；1997 年达到 60 亿。人口的增长速度越来越快。现在，全球平均每年增加近 1 亿人口。人口的急剧增长给生态环境带来了巨大压力，加剧了人与自然的矛盾。

第五节　生态系统可持续发展的研究方法

生态系统可持续发展，实质上就是维持生态系统的生态承载力，促进生态系统的健康、稳定与良性循环。所谓生态承载力指生态系统的自我维持、自我调节能力，资源与环境的供容能力及其可维持的社会经济活动强度和具有一定生活水平的人口量。生态系统可承受自然与人为活动的能力，即生态承载力作为评价生态系统可持续发展的依据。

一、生态承载力判定模式

通俗地讲，生态承载力可理解为生态系统对所承载对象的支持能力。因此，生态系统的承载状况，可用生态系统承载指数、生态系统压力指数和生态系统承压度三个指标体系来描述。

(一) 生态系统承载指数表达模式

根据生态承载力定义，生态承载力的支持能力大小取决于三个方面，即生态弹性能力、资源承载能力和环境承载能力，因此生态系统承载指数也应从这三个方面来确定，

分别称为生态弹性指数、资源承载指数和环境承载指数。

1. 生态弹性指数

生态弹性指数，也称生态弹性度。大量研究表明，生态系统的弹性力主要取决于生态系统的特征要素，即地质地貌、气候、土壤、水文和植被等条件。生态弹性度可表达为

$$\mathrm{CSI}^{\mathrm{eco}} = \sum_{i=1}^{n} S_i^{\mathrm{eco}} W_i^{\mathrm{eco}} \qquad (n=1，2，\cdots，5)$$

式中：$\mathrm{CSI}^{\mathrm{eco}}$ 为生态弹性度；S_i^{eco} 为生态系统的特征要素，即地质地貌、气候、土壤、水文和植被要素；W_i^{eco} 为要素 i 相对应的权重值。

1) 权重确定。由于植被、气候等要素还包括若干分要素，所以实际组成要素是分层次构成的多要素，因而权重的确定可采用层次分析法(AHP)或灰色层次分析法。

2) 分值的确定。分值的确定可根据已有标准来确定，可采用理想值或目标期望值作为参照标准，将标准记为 100 分，其他根据与标准值的比值计算确定，计算公式为

$$C_i = F_i/F_0 \times 100$$

式中：C_i 为 i 因子的分值；F_i 为实际测量值或出现值；F_0 为标准值、目标值或理想值。

2. 资源承载指数

在一般情况下，影响一个区域发展的资源主要包括土地资源、水资源、矿产资源和旅游资源等，因此资源承载指数可表达为

$$\mathrm{CSI}^{\mathrm{res}} = \sum_{i=1}^{n} S_i^{\mathrm{res}} W_i^{\mathrm{res}}$$

式中：$\mathrm{CSI}^{\mathrm{res}}$ 为资源承载指数；S_i^{res} 为资源组成要素；W_i^{res} 为要素 i 的相应权重值；n =1，2，…，4，分别代表土地资源、水资源、旅游资源和环境资源。

3. 环境承载指数

环境承载力包括水、大气、土壤、空间等环境部分，因此环境承载指数可表达为

$$\mathrm{CSI}^{\mathrm{env}} = \sum_{i=1}^{n} S_i^{\mathrm{env}} W_i^{\mathrm{env}}$$

式中：$\mathrm{CSI}^{\mathrm{env}}$ 为环境承载指数；S_i^{env} 为环境组成要素；W_i^{env} 为要素 i 的相应权重值；n =1，2，3，分别代表水环境、大气环境和土壤环境。

（二）生态系统压力指数表达模式

对地球生态系统而言，生态系统的最终承载对象是具有一定生活质量的人口数量，因此生态系统的压力指数可通过其承载的人口数量和相应的生活质量来反映。人

口数量越多，压力越大；同样，生活质量越高，压力越大。据此，生态系统的压力指数可表达为：

$$CIP^{pop}=\sum_{i=1}^{n}P_i^{pop}W_i^{pop} \qquad (i=1, 2, \cdots, n)$$

式中：CPI^{pop} 为以不同人口表示的生态系统压力指数；P_i^{pop} 为不同类群人口数量；W_i^{pop} 为相应类群人口的生活质量权重值。

（三）生态系统承载压力度表达模式

承载压力度的基本表达式为：

$$CCPS=CCP/CCS$$

CCS 和 CCP 分别为生态系统中支持要素的支持能力大小和相应要素的压力大小。在实际计算中，可根据具体情况对其进行转化。比如，资源承载力可转化为

$$CCPS^{res}=1-P_t\times(Q_t^{res}/Q_s^{res})^{-1}$$

当以承载饱和度表示时，则为

$$CCF^{res}=1-(Q_t^{res}/Q_s^{res})\times P_t^{-1}$$

式中：CCPS 为以人口表示的 R 资源压力度；Q_t^{res} 为 R 资源实有量；Q_s^{res} 为标准人均 R 资源占有量；CCF^{res} 为承载饱和度；P_t^{-1} 为区域实际人口数。

当 CCF^{res} 为零时，表明 R 资源承载压力度达到平衡，人口数量适中；当 CCF^{res} 为正数时，表明人口压力大于资源承载能力；反之，当 CCF^{res} 为负数时，表明资源承载能力大于人口压力，CCF^{res} 越小，压力度越小。

二、生态承载力综合评价

（一）评价的指导思想与基本程序

1. 指导思想

从生态承载力的概念可知，生态可持续承载应满足三个条件，即压力作用不超过生态系统的弹性度、资源供给能力大于需求量、环境对污染物的消化容纳能力大于排放量。可见生态承载力实质上包含了多层涵义，因此对生态承载力的评价应采用分级评价的方法，以全面有序地了解生态系统的承载力状况。生态系统的弹性力是生态承载力的支持条件，可视为生态承载力的第一层涵义，因此一级评价可以生态弹性度作为评价准则；资源的持续供给和环境的持续承纳分别是生态承载力的基础条件和约束条件，是实现可持续承载的基本保障，可视为生态承载力的第二层涵义，因此二级评价可以资源和环境条件作为评价准则；承载对象对承载媒体的压力反映了生态系统的饱和度，是对

生态系统现有承载状况的直接反映，因此三级评价可以承载压力度作为评价准则。

2. 评价程序

评价程序可扼要地概括为 3 个主要步骤，如图 18-4 所示。

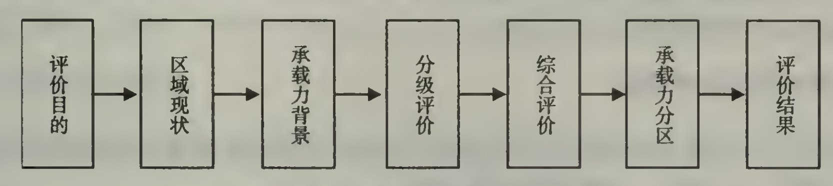


图 18-4　区域生态承载力评价程序

1) 区域现状调查。包括生态环境现状调查和社会经济现状调查，采用的方法主要是实地考察、遥感监测、历史数据和统计资料收集等。

2) 区域承载状况评估。在对区域承载力现状与背景了解的基础上，利用上述承载力评价模式与方法，分别对各级承载力做出正确评估。

3) 综合分析评价。根据一、二、三级评价结果，对区域生态承载力状况做出综合分析评价，并在可能的情况下，绘出生态分区图。

(二) 评价的指标体系

1. 一级评价指标体系构成

1) 目标层。一级评价以生态系统弹性度作为评价指标，主要目的是衡量不同区域生态系统的自然潜在承载能力。因此目标层以生态弹性度作为评价指标。

2) 准则层。由于影响生态系统弹性度的主要因素是地质地貌(S_1)、气候(S_2)、土壤(S_3)、植被(S_4)和水文(S_5)，因此选择这 5 项因子作为准则层评价指标，但由于地物覆盖不一定是植被，所以以地物覆盖代替植被。

3) 指标层。根据准则层各指标的特征和承载力意义，共选取 12 个指标作为指标层评价指标，具体组成如下(图 18-5)：

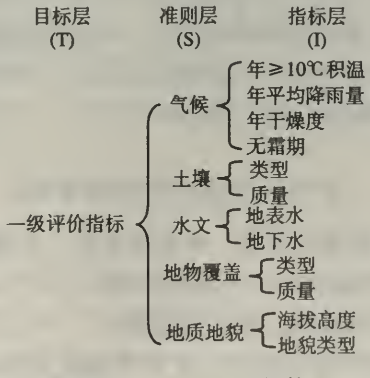


图 18-5　一级评价指标体系

S_1={I_1，I_2}={海拔高度，坡度}

S_2={I_3，…，I_6}={≥10℃积温，无霜期，降雨量，干燥度}

S_3={I_7，I_8}={土壤类型，土壤质}

S_4={I_9，I_{10}}={植被类型，植被覆盖度}

S_5={I_{11}，I_{12}}={地表水，地下水}

2. 二级评价指标体系构成

二级评价以资源和环境单要素承载力为基准，以资源-环境承载能力作为目标，具体分为目标层、准则层、指标层和分指标层。

1) 目标层。二级评价的目标为资源-环境承载力(T)，在实际应用中，该方法既可用于比较不同区域的承载力差异，也可用于评价同一区域在不同发展阶段的承载力动态变化，还可用于不同决策方案下的承载力大小比较和方案选择。

2) 准则层。资源承载条件(S_1)、环境承载条件(S_2)作为准则层的评价依据。资源承载力选择水资源(I_1)、土地资源(I_2)、林业资源(I_3)、矿产资源(I_4)、旅游资源(I_5)作为评价指标，环境承载力以大气环境(I_6)、水环境(I_7)、土壤环境(I_8)作为具体评价指标。

3) 指标层。指标层由上面提到的 I ={I_1，I_2，…，I_8}8 个指标构成，每个指标又通过具体的分指标来反映其情况。各指标的分指标构成如下(图 18-6)：

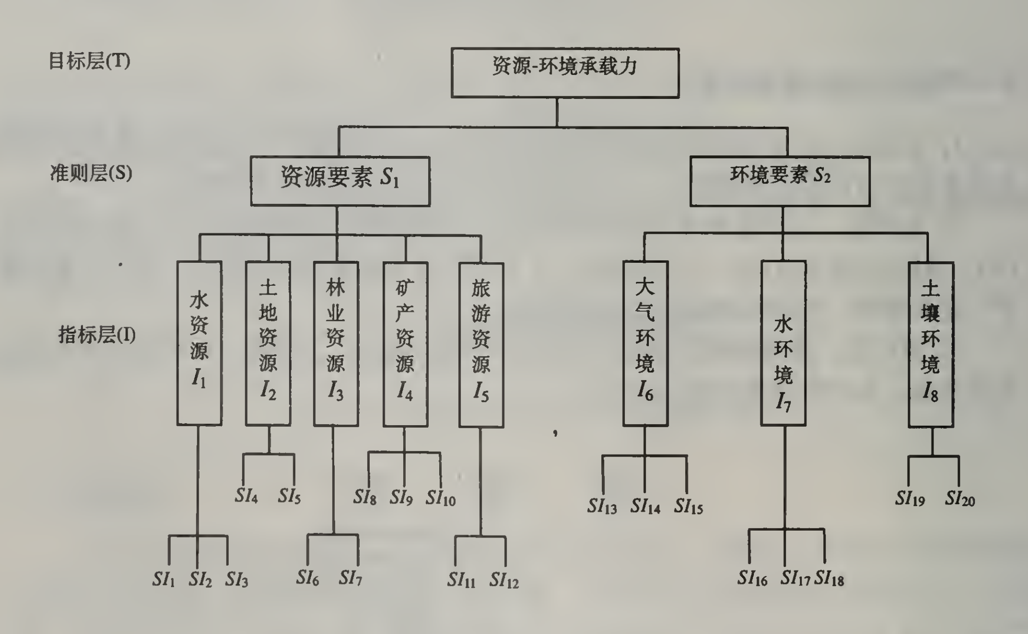


图 18-6　二级评价指标体系构成

I_1={SI_1，SI_2，SI_3}={水资源占有量，水资源质量，水资源利用率}

I_2={ SI_4，SI_5}={宜农(牧)地面积，土地生产率}

I_3={ SI_6，SI_7}={林业资源面积，年可利用量}

I_4={ SI_8，SI_9，SI_{10}}={矿产资源储量，矿产资源品位价值，年开采量}

I_5={ SI_{11}，SI_{12}}={旅游资源等级，旅游条件}

I_6={ SI_{13}，SI_{14}，SI_{15}}={SO_2，NO_x，TSP}

I_7={ SI_{16}，SI_{17}，SI_{18}}={COD，BOD，pH}

I_8={ SI_{19}，SI_{20}}={生活垃圾消纳能力，工业垃圾消纳能力}

值得注意的是，上述指标是针对一般情况而言的，对特定情况可根据具体目标有重点地选择相应指标。同样，对单项指标或因子的选择和评分也应根据评价目的而确定。

3. 三级评价指标体系构成

三级评价以承载压力度作为评价指标，其指标体系构成如下(图 18-7)。

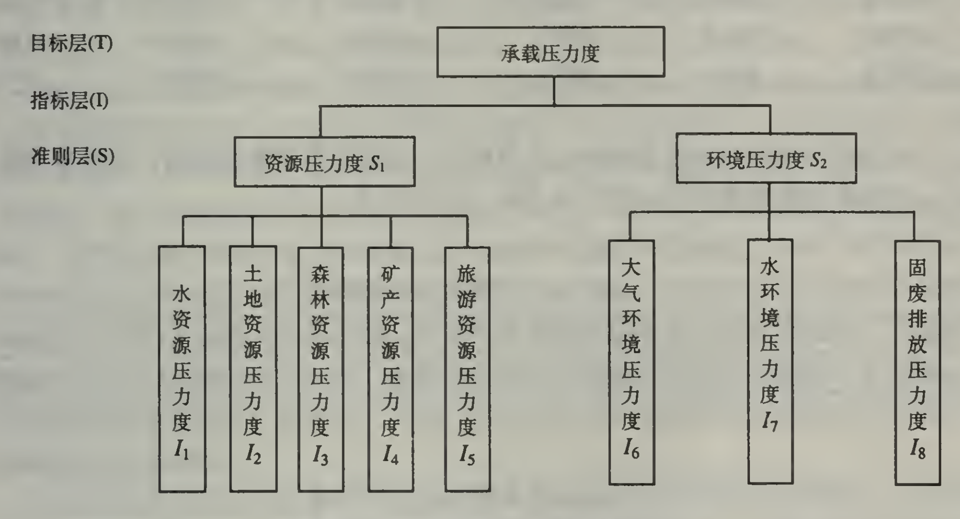


图 18-7　三级评价指标体系构成

1) 目标层。三级评价以承载压力度为目标，主要目的是反映生态承载力的客观承载能力大小与承载对象之间的关系，因此目标层以承压度作为衡量指标。

2) 准则层。在经济生态系统中，人是最终被承载对象，也是最终可持续发展对象，因此以人口压力度作为评价准则，具体选择人口对资源与环境的压力度作为指标。

3) 指标层。以资源和环境两大要素作为具体评价指标，压力度计算方法见生态系统承载压力度表达模式。资源压力度以水资源压力度、土地资源压力度、矿产资源压力度、森林资源压力度、旅游资源压力度作为评价指标。环境压力度以水环境压力度、大气环境压力度和固体废弃物消纳压力度作为评价指标。如果承载饱和度大于 1，说明该区域在现有条件下已没有发展余地，如果继续发展，将会导致更严重的环境污染和生态破坏；反之，如果承载饱和度小于 1，说明该区域有继续发展的潜力。

(三) 综合评价方法

根据三级计算结果，对生态承载力进行综合评价。对一级评价，由于评价结果主要反映的是生态系统的自我抵抗能力和生态系统受干扰后的自我恢复与更新能力，所以分值越高，表示生态系统的承载稳定性越高，80 分以上表示承载稳定性最高，80~60 分表示承载稳定性较高，其余依次类推，20 分以下表示承载稳定性最低；对二级评价，由

于主要反映的是资源与环境的承载能力，实际上代表了现实承载力的高低，所以分值越大，表示现实承载力越高，分值越小，表示现实承载力越小；对于三级评价，分值由高到低反映了生态系统的压力大小，分值越高，表示系统所受压力越大，100~80 分表示压力非常大，20 分以下表示压力较小，详见表 18-2。

表 18-2 生态承载力分级评价表

分值	<20	21~40	41~60	61~80	>80
一级评价	弱稳定	不稳定	中等稳定	较稳定	很稳定
二级评价	弱承载	低承载	中等承载	较高承载	高承载
三级评价	弱压力	低压力	中等压力	较高压力	强压力

当承载压力度以饱和度表示时，分值越大，表示承载饱和度越高。同样根据饱和度大小，可将承载饱和度(CCF_R)划分为 5 级，见表 18-3。

表 18-3 承载饱和度分级表

CCF_R	<- 0.25	- 0.25~- 0.05	- 0.05~0.05	0.05~0.25	>0.25
饱和度	极低载	低载	平衡	超载	严重超载

(四) 分级评价的目的与意义

1) 使评价结果更明了、准确，更有针对性。分级评价的主要目的是为了使评价结果更明了、准确，更有针对性。比如某区域生态承载力分级属于“低稳定高承载区”，说明该区域的现状承载力虽很高，但因该区域为不稳定区，对外界干扰的抵抗和恢复能力较低，因此对这类区域应予以特别保护。

2) 有利于准确判断生态承载力高低的缘由。对生态承载力分级有利于对其承载能力高低的缘由做出更准确的判断。如果将所有生态承载力指标汇总到一起，则必然会因指标太多而使结果复杂化，难以对结果做出精确判断。分级将同性质的指标归类处理后，则可比较容易地对结果进行分析判断。比如某区域属于“极不稳定高承载区”，说明该区域的生态弹性度很低，高承载的最大可能原因是资源丰富或技术经济基础好。对这类区域需要谨慎地开发和高度保护。

3) 便于采取相应的对策与措施。分级可对区域生态承载力有一个更深刻的了解，可更有针对性地采取相应的对策与措施。

4) 便于计算和研究。对生态承载力分级可将指标归类处理，这样便于计算和研究，所得结果也更客观、准确，更符合实际情况。

第六节　可持续生态系统管理与规划

一、可持续生态系统管理

(一) 生态系统管理概述

生态系统管理(ecosystem management)源于传统的林业资源管理和利用过程，20 世纪开始受到人们的重视。近年来随着生态问题全球化，越来越多的生态学家开始关注生态系统管理，并将其与可持续发展联系起来。关于生态系统管理的概念，目前尚未形成统一的定义。不同的学者有不同的定义，比如美国林学会(1992)认为生态系统管理强调生态系统诸方面的状态，主要目标是维持土壤生产力、遗传特性、生物多样性、景观格局和生态过程。美国生态学会(1996)认为生态系统管理有明确的目标，并执行一定的政策和规划，基于实践和研究并根据实际情况作调整，基于对生态系统作用和过程的最佳理解， 管理过程必须维持生态系统组成、结构和功能的可持续性。Dale 等(1999)认为生态管理是考虑了组成生态系统的所有生物体及生态过程，并基于对生态系统最佳理解的土地利用决策和土地管理实践过程。生态系统管理包括维持生态系统结构、功能的可持续性，认识生态系统的时空动态。生态系统功能依赖于生态系统的结构和多样性，土地利用决策必须考虑整个生态系统。可见，生态系统管理是合理利用生态系统和保护生态系统健康的有效途径。

生态系统管理的关键主要集中在自然系统与社会经济系统结合的问题上。这些问题包括：生态系统管理要求融合生态学的知识和社会科学的技术，并把人类社会价值整合进生态系统；生态系统管理的对象包括自然和人类干扰的系统；生态系统功能可用生物多样性和生产力潜力来衡量；生态系统管理要求科学家与管理者定义生态系统退化的阈值；生态系统管理要求人类利用对生态系统有影响的系统科学的研究结果作指导；由于利用生态系统某一方面的功能会损害生态系统其他的功能，因而生态系统管理要求人们理解和接受生态系统功能的部分损失，并利用科学知识做出最小损害生态系统整体性的管理选择；生态系统管理的时间和空间尺度应与管理目标相适应；生态系统管理要求发现生态系统退化的根源，并在其退化前采取措施。

(二) 可持续生态系统管理的数据基础

对可持续生态系统进行管理必须收集一些相关的时间与空间尺度的数据和知识，主要包括 4 种。

1. 在植物个体和种群尺度上

气候(微气候)、地形(微地形)、土壤理化性质、消费者层次、植物生理生态特征、植物遗传、共生、营养和水分条件等。这些数据的时间尺度是小时、天或年。

2. 在群落和生态系统尺度上

气候(微气候)、地形(微地形)、种类组成与多度、土壤理化性质、消费者层次、植物组织的流通率及分解、活与死有机质的空间分布、植物对水分和营养利用的形态适应、共生、营养和水分条件。这些数据的时间尺度是年或几年。在收集这些数据时，气候因素常被当作常量，样地较小时应收集更多的数据，可用更多的变量来研究生态过程的控制与反馈。

3. 在景观尺度上

气候、地形、群落与生态系统类型、土壤物理特性、生态系统类型的空间分布。这些数据的时间尺度是几年或几十年。在研究景观尺度的问题时，要考虑明确的边界和空间异质性，在进行尺度推绎时，部分的叠加可当作整体的性质，主要研究方法有 GIS 和模型研究，景观尺度是评价动物生境的最佳尺度。

4. 在生物圈尺度上

气候、地形和植被类型。由于空间尺度太大，一些生态学过程的速率较慢。气候是植被分布的决定因子，时间尺度不重要，海拔对种类分布的影响可忽略。

当然，并不是所有的生态系统管理都要收集上述数据，实际管理时只需收集核心层次的数据，并适当考虑其相邻的上下层次的部分数据。

(三) 可持续生态系统管理的度量

可持续生态系统管理必须考虑系统的变化，以确定管理方式，促进生态系统稳定与可持续发展。生态系统状态可用抵抗力(resistance，系统维持稳定状态的程度或吸收干扰的能力)、恢复力(resilience，在干扰后系统返回干扰前状态的速度)和持续力(persistence，系统在某种状态下所延续的时间长度)。Westman(1985)将恢复力分为 4 个可测量成分：弹性(elasticity，系统恢复到干扰前状态的时间)、振幅(amplitude，系统受干扰前后状态差异程度)、滞后性(hysteresis，干扰移走后系统的恢复时间)、可塑性(malleability，系统恢复后的状态与干扰前状态的差异)。研究生态系统变化的参数一般采用生物多样性、生态系统净初级生产力、土壤、非生物资源(营养库及其流动、水分吸收及利用等)和一些生理学指标。确定生态系统变化的方法有：比较初级生产力、分解速率的理论值与实际值、估算样地间标准物质或生物体的转移、观察指示种或功能群、稳定性同位素(比如 C、H、N 元素)方法、3S 技术(遥感 RS、地理信息系统 GIS、全球定位系统 GPS)光谱分析方法、时空尺度交叉的整体分析方法(比如梯度分析、边界分析)、大量数据的合成分析、生态风险评价等。从管理者和生态系统“使用者”的角度看，更关注生态系统产品(ecosystem good)和服务(ecosystem service)功能的变化，这些指标包括可提供的食物、药物和材料、旅游价值、气候调节作用、水和空气的净化功能、美学价值、废物的去毒和分解、传粉播种、土壤的形成、保护与更新等，生态学家与管理者的度量指标的结合可能是生态系统管理发展的方向之一。

(四) 可持续生态系统管理的要素

可持续生态系统管理的要素包括：根据管理对象确定可持续生态系统管理的定义，该定义必须把人类及其价值取向作为系统的一个成分；确定明确的、可操作的目标；确定可持续生态系统管理的边界和单位，尤其是确定等级系统结构，以核心层次为主，适当考虑相邻层次内容；收集适量的数据，理解系统的复杂性和相互作用，提出合理的生态模式及生态学解释；监测并识别可持续生态系统的动态特征，确定生态学限制因子；注意幅度和尺度，熟悉可忽略性和不确定性，并进行适宜性管理；确定影响管理活动的政策、法律和法规；仔细选择和利用生态系统管理的工具和技术；选择、分析和整合生态、经济和社会信息，并强调部门与个人间的合作；实现生态系统的可持续性。此外，在生态系统管理时必须考虑时间、基础设施、样方大小和经费等问题。可持续生态系统管理要求生态学家、社会经济学家和政府官员通力合作，虽然这种合作一时还难以实现，但作为一项改善生态环境的措施与技术，这种合作是十分必要的，它要求各方面相互配合，达成共识，加强生态系统的科学管理，促进其可持续发展。

(五) 可持续生态系统管理的目标、原则与方法

1. 可持续生态系统管理的目标

生态系统健康、稳定与可持续发展是可持续生态系统管理的目标。该管理目标着眼于保持和维护生态系统结构、功能的可持续性，保证生态系统的健康和可持续发展。

2. 可持续生态系统管理的原则

1) 动态性原则。生态系统总是随时间而变化，并与周围环境和生态过程相联系。生物与生物、生物与环境间相互联系，使系统在输入与输出过程中，有收有支，维持需求平衡。在自然条件下，生态系统动态总是自动向物种多样性、结构复杂化和功能完善化方向演替。只要有足够的时间和条件，系统迟早会进入稳定阶段。在可持续生态系统管理中要关注这种动态、不断调整管理体制和策略，以适应系统的动态发展。

2) 层次性原则。生态系统内部各个子系统都是开放的，许多生态过程并不都是同等的，既有高层次与低层次之别，又有包含型与非包含型之别。系统的这种差别主要是由系统形成时的时空范围(植物及其种群、生态系统、景观、生物圈)差别形成的，管理中时空背景应与层次相匹配。

3) 创造性原则。生态系统的自调节过程是以生物群落为核心，具有创造性。创造性的源泉是系统的多种功能流。创造性是生态系统的本质特征，必须得到高度重视，以保证生态系统提供充足的资源和良好的系统服务。

4) 有限性原则。生态系统的一切资源并非“取之不尽、用之不竭”，而是有限的，对生态系统的开发利用必须维持其资源再生和恢复的功能。同时生态系统对污染物也有一定限度的承受能力，因此污染物的排放不能超过该系统的承载能力或环境容量极限。当超过限量其功能就会受损，严重时系统就会衰败，甚至崩溃。

5) 多样性原则。结构复杂性和生物多样性对生态系统是极其重要的，它既是生态系统适应环境变化的基础，又是生态系统稳定和功能优化的基础。维护生物多样性是生态系统管理计划中必不可少的关键部分。当多物种研究方法不能为生态系统管理提供完整的信息时，可采用单一物种或少数物种的研究方法来为生态系统管理提供有价值的信息。

6) 人类是生态系统的组分原则。人类具有双重地位，人类既是其他对象的管理者，人类自身又是被管理者。管理是靠人来推动和执行的。因此，可持续生态系统成功管理的关键是提高人的素质。即提高全人类的生态意识和可持续发展意识，加强规范人类行为的法规、政策和制度建设，这是可持续生态系统管理的核心内容之一。

二、生态风险评估

(一) 生态风险评估的概念

生态风险评估是利用生态学、环境化学及毒理学知识，定量分析环境危害对人类的负效应的概率及其强度的过程(Suter II　1993)。它为科学评价某种人为或自然活动对环境的影响及其生态效应提供了一种有效工具，也为资源与环境的持续利用提供了一条重要的途径。生态风险评估的目的在于通过对某种环境危害导致的负效应进行科学评价，为生态环境保护和管理工作提供依据。

(二) 生态风险评估的步骤

生态风险评估主要包括 4 个步骤，即确定问题、分析过程、风险特征化及风险管理(图 18-8)，事实上，最后一个步骤即风险管理已不属于生态风险评估范围。但为了研究的连贯性，在此对其进行简要论述。

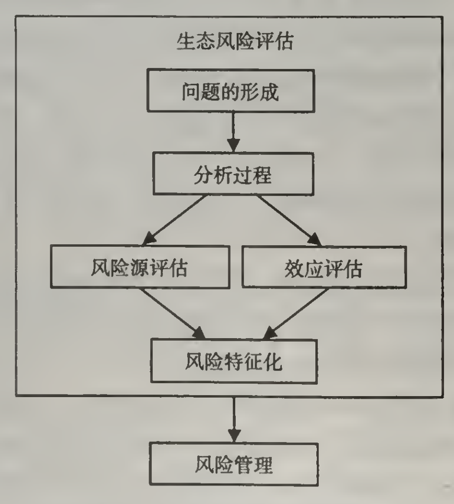


图 18-8　生态风险评估框图

1. 确定问题

确定问题是指确定生态风险评估范围和目的的过程。由于生态风险评估涉及不同的水平或尺度(比如个体、种群、生态系统、景观等)，评估范围和目的取决于具体的情况，因此在评估中首先要明确研究的目的。要做到这一点，评估者必须定义或选择评估结点(endpoint)。所谓生态风险评估结点是指风险源引起的非愿望效应。典型的结点比如杀虫剂引起的鸟类死亡、酸雨引起的鱼类死亡等。一种风险源可能导致多种结点，比如森林破坏可引起某些物种灭绝、生物多样性减少、水土流失等，结点的选择要满足 3 个条件。

1) 受到社会关注。选择的评估结点应是决策者及公众所关心的和有价值的问题。

2) 具有生物学重要性。

3) 具有实际测定的可行性。在实际操作中，对具有社会重要性和生物学重要性的结点要优先考虑。

2. 分析过程

根据评估结点，确定分析方法及收集有关数据。分析方法主要是根据研究目的来确定所采用的模型和建模方法。数据来源包括文献数据和数据库数据。分析过程包括两部分内容。

1) 风险源评估。风险源评估(exposure assessment)，即对灾难本身的特征评估。评估者可根据风险源具体情况选取适当的模型，确定模型中的参数，对风险源本身的特征进行描述与评估。

2) 生态效应评估。生态效应评估(effect assessment)，即定量地确定增加某种危害物(比如杀虫剂)的暴露强度而引起生态效应的强度及频度加强的过程，也称为剂量-反应评估或毒理学评估。生态效应评估可确定危害物暴露强度与评估结点间的关系。目前大多数的风险效应评估主要根据毒理学实验进行。在效应评估过程中，首先要进行毒理实验以确定不同暴露浓度和各种持续时间组合对所考虑的生物指标(死亡率、生长速度等)的影响。其次根据实验结果建立统计模型或数学模型，以及虚拟的评估效应模型。最后利用与种群及生态系统过程有关的实验结果数据对效应模型进行参数化，这样得到的模型可以模拟评估结点对风险源暴露强度的效应水平。

3. 风险特征化

风险特征化是将分析步骤中的两部分内容即风险源评估和效应评估结合起来，总结危害物导致的生态危机过程。风险特征化具体包括：

1) 总结对风险源评估的结果。

2) 风险定量化。当风险源由多个组分组成时，则先逐一把每一组分对研究对象的风险定量化，再综合各种风险源组成对同一研究对象的风险，即总效应风险。

3) 对生态评估中的不确定性进行评估。

4) 参考研究地区在这方面已有的研究，为下一步的风险管理提供合理化建议。

综合风险评估与效应评估以及将风险定量化是风险特征化的中心任务。通常风险源

评估和效应评估的综合结果以 1~2 个不同的维数(变量)来表述。常用的维数有：反映风险源暴露强度的化学物质的浓度，化学物质暴露持续的时间，生物个体、种群或群落反应的比例，生态效应的严重性等。

风险特征化除了通过不同维数定量终结生态风险评估结果的特征外，还包括对所用模型及其背景的讨论，包括模型所用数据及参数的来源，以及评估过程中不确定性的来源及其定量化程度的讨论。此外，若评估结果与评估者的假设有冲突，应给出可能的解释或其他新的假设。

4. 风险管理

风险管理是指对生态风险评估的结果应采取的对策与行动的决策过程。通常管理者或决策者需要考虑如何在不影响其他社会价值的情况下尽量减少这种风险。虽然风险管理已不属于评估者的工作，可以独立地进行，但风险评估的结果是风险管理的重要依据。因此，为使风险评估的结果充分发挥作用，生态风险评估者、风险管理者或决策者之间应建立良好的合作关系，共同搞好生态风险评估与管理工作。

(三) 生态风险评估的方法

生态风险评估方法包括建立或选择模型以对风险源的暴露特征及其生态效应进行定量化、检验模型的有效性及对生态风险评估的不确定性进行定量分析。

1. 建模

建立模型的途径有多种，一般可通过物理、统计以及数学的方法进行建模。

1) 物理方法。在生态评估中最常用的物理方法是进行实验室实验。通过实验手段建立的物理模型是对某种过程或系统的物质表述，而一般这种过程或系统在自然状况下不易模拟。通过实验得出的结果或建立的模型可以代表在其他系统中的类似情况或过程。 比如对胖头小鲤鱼的致死实验结果可以代表其他鲤鱼、鱼类和其他水生有机体的致死效应(Suter Ⅱ 1993)。

2) 统计方法。通过回归、多元分析及其他统计技术来总结实验或观测的数据，可以建立统计模型。在风险评估中利用统计模型有三个明确的目的和用途，即假设检验、过程描述、推断或外推。

① 假设检验 由于统计学家和实际工作者的建议以及风险评估中假设检验的结果与传统假设检验结果在解释上的差异(Peterman and Bradford 1987，Vaughan et al. 1982，Yoccoz 1991)，目前认为假设检验不适于在风险评估中应用。

② 描述 通过分类或排序等方法将生态系统中自然的和不同污染程度的生物群落分开，以增加对系统的认识，或用于形成进一步的假设或进一步指导取样。

③ 推理或外推 即估测的结果来自统计模型的预测，而不是实测的结果。最常见的是将统计模型外推到估测建模数据之外的范围或从一类可得到的数据外推到难以得到的数据。比如在人类健康风险评估中，可将啮齿动物的剂量-反应数据外推应用于人

类。但应注意，利用统计模型进行外推假设的前提是因变量与自变量间的关系应在观测范围内外保持一致，否则外推结果就会失真。统计模型只能总结变量间的关系，而不能解释现象中的机理关系。

3) 数学方法。通过数学模型建立机理模型(mechanistic model)，其目的是定量描述某种现象和造成该现象的原因以及这二者间的关系。由于任何模型均是某一系统的简化代表，不可能包括所有细节，简化的结果必然会产生误差。因此，对机理模型是否适用于生态研究一直存在着争议(Lauer et al. 1981)。但机理模型可对不同时间、地点的观测进行综合，并可阐述系统中的机制关系，因此在许多评估中是不可缺少的。通常，生态风险评估者感兴趣的机理模型分两类，即灾变模型(fatal model)和效应模型(effect model)。灾变模型模拟风险源，是风险源评估的有效工具。效应模型模拟风险源引起的生态效应，是效应评估的重要手段。效应模型可在不同的水平进行模拟，使用范围极广。

2. 模型的证实

模型的证实(model validation)，是指把模型得出的结果与直接观测的结果或理论推导的结果进行比较的过程(Mankin et al. 1975)。由于每个模型均有简化，不可能准确地与现实完全对应，但有的模型较其他模型能更客观地反映现实，因此将模型的证实过程作为一个选择相对有效模型的过程是恰当的。一个模型的可信度可从多方面考虑，最明显的是通过实验证实，但这常常只是一种设想，实际中难以操作和实现。最常用的方法是将模型结果与已有的结果进行比较。很多定量方法可以用来比较模型结果与测定结果，其中多数与适宜性测定有关，比如方差分析、因子分析、回归分析、Kolmogorov-Smirnov 检验等。此外，还可通过调查该模型是否在实践中被采用来对模型进行证实。

3. 不确定性的定量分析

风险评估中不确定性主要来自于 3 方面，即现有知识的不完整性、自然界固有的随机性和评估过程的误差。生态风险评估中不确定性分析主要指对由自然随机和评估误差引起的不确定性进行分析，评估误差可分为参数误差和模型误差。利用统计模型和数学分析，可对随机误差和参数误差进行量化分析。蒙特卡罗(Monte Carlo)技术，是分析生态风险评估中不确定性的主要方法。其主要步骤是定义输入参数的统计分布(当缺乏资料时，输入参数的统计分布视为正态分布，变异系数 CV 为 100%)、从这些分布中随机取样、利用随机选择的参数组进行无限次(比如 M＞1000)重复性的模型模拟、分析，输出结果。但模型所产生的误差不能用此方法量化，模型误差(因不适当的变量选择或聚合产生或不正确的函数关系产生的误差)是生态风险评估中产生不确定性的重要原因。模型误差可通过利用其他替代模型，比较不同模型的结果来进行检验。比如将统计模型外推的结果与机理模型的结果进行比较，如果结果类似，则模型的可信度较高(Suter II et al. 1984)。实践中很难准确地定量模型误差，因此在可能的情况下可利用多种途径进行风险评估。

三、生 态 规 划

（一）生态规划的概念

生态规划(ecological planning)，是指以生态学原理和区域规划原理为指导，应用系统科学、环境科学等多学科的手段辨识、模拟和设计人工生态系统内的各种生态关系、确定资源开发利用与保护的生态适宜度，探讨改善系统结构与功能的生态建设对策，促进人与环境关系持续协调发展的一种规划方法。生态规划具有以人为本，以资源环境承载力为前提，系统开放、优势互补，高效、和谐和可持续性等显著特征。

（二）生态规划的原则

1. 整体优化原则

从系统分析的原理和方法出发，强调生态规划目标与区域或城乡总体规划目标的一致性，追求社会、经济和生态环境的整体最佳效益，努力创造高效、和谐、稳定的可持续复合生态系统。

2. 趋适开拓原则

以环境容量、自然资源承载力和生态适宜度为依据，创新生态工程技术，改善区域或城乡生态环境质量，寻求最佳的区域或城乡生态位，不断地开拓和占领空余生态位， 充分发挥生态系统的潜力，强化人为调控生态变化趋势的能力。

3. 协调共生原则

利用生态系统中社会、经济和自然子系统各组分与要素的互利共生关系，发挥资源最大生产潜力，保持子系统各层次、各要素与周围环境的协调、有序和动态平衡，达到生态规划与城乡总体规划远近目标的协调一致。

4. 区域分异原则

生态规划要坚持区域分异理论，在充分研究区域或城乡生态要素功能现状、问题及发展趋势的基础上，综合考虑国土规划、城乡规划，搞好生态功能分区，以充分利用环境容量，促进社会经济发展、提高生活质量，实现社会、经济与生态效益的统一。

5. 生态平衡原则

遵循生态平衡原理，在生态规划中要重视搞好水、土、大气、人口、经济等生态要素的子规划，合理安排产业结构和布局，城乡生产力布局，发挥生态系统最佳服务功能，维护生态系统动态平衡，促进其协调、稳定与可持续发展。

6. 高效和谐原则

生态规划的目的是将人类聚居地建成一个高效和谐的社会-经济-自然复合生态系统，使其内部的物质代谢、能量流动和信息传递形成一个环环相扣、紧密联系的网络，使物质和能量得到多层分级利用，废物循环再生利用，各部门、各行业间形成发达的共生关系，系统的结构功能充分协调，能量损失最小，物质利用率最高，社会、经济和生态效益最佳。

7. 可持续发展原则

遵循可持续发展原则，在生态规划中突出“既满足当代人的需求，又不危及后代人满足其发展需求能力”的思想，注重在发展过程中合理利用自然资源，并为后代维护、保留较好的资源条件，使人类社会得到公平的发展。

（三）生态规划的程序与步骤

Steiner(1960)认为生态规划的程序分 7 个步骤，即确定规划目标→资源数据清单和分析→区域适宜度分析→方案选择→规划方案实施→规划执行→方案评价。McHarg(1969)在《结合自然的设计》一书中提出了城市与区域规划的生态学框架，对生态规划的程序进行了较全面的探讨，该生态规划框架对后来的生态规划影响很大，现已成为生态规划的一个基本思路，人们称之为 McHarg 生态规划法，该方法主要包括确立规划范围与规划目标、广泛收集规划范围内的自然与人文资料(主要包括地理、地质、气候、土壤、野生动物、自然景观、土地利用、人口、交通、文化、人的价值观调查等，并将这些资料分别描绘在地图上)、根据规划目标提取所收集的资料、对各要素及各种资源开发利用方式进行适宜度分析并确定适宜等级、建立综合适应性图等 5 个步骤。McHarg 法的核心在于根据区域自然环境与自然资源的性能，对其进行生态适宜度分析，以确定土地利用方式与发展规划，从而使自然资源的利用与开发及人类的活动与自然协调统一。

在总结和参照前人生态规划工作经验的基础上，根据生态规划的目标，通过对区域社会-经济-自然复合生态系统广泛调查，结合专家咨询意见，应用生态学、环境学、经济学、系统科学和城市规划的原理与方法，生态规划的基本程序和技术路线如图 18-9。

（四）生态规划的主要内容与方法

1. 生态要素的调查与评价

生态规划调查就是调查搜集规划区域的自然、社会、经济、人口与环境的资料与数据，为充分了解规划区域的生态特征、生态过程、生态潜力与制约因素提供基础。资料搜集包括历史资料搜集、实地调查、社会调查与 3S 技术调查等。

(1) 生态调查

生态调查多采用网格法，即在筛选生态因子的基础上，按网格逐一进行生态状况的调查与登记，方法如下：

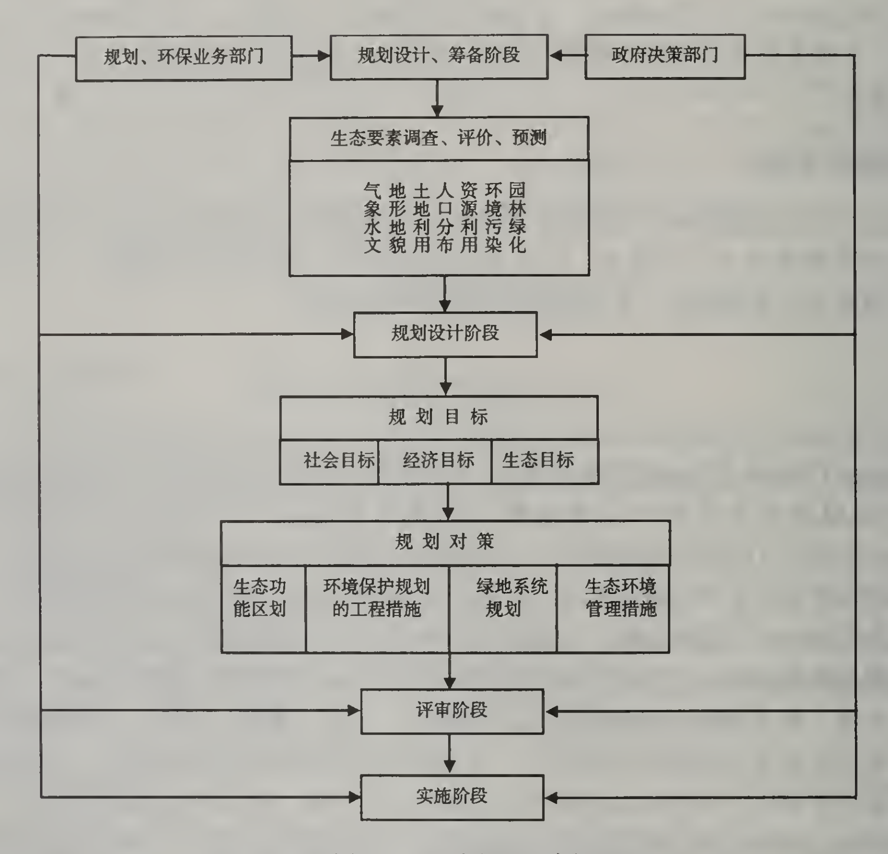


图 18-9 生态规划程序框图

1) 确定规划区范围。采用 1∶10 000(较大区域为 1∶50 000)地形图为底图，依据一定原则将规划区域划分为若干个网格，网格一般为 1km×1km，也可用 0.5km×0.5km(网格大小视具体情况而定)，每个网格即为生态调查的基本单元。

2) 调查登记。调查登记的主要内容包括规划区的气候条件、水资源、植被、地形地貌、土壤类型、人口密度、经济密度、产业结构与布局、土地利用、建筑密度、能耗密度、水耗密度、环境污染状况等，并进行初步的分析评价。可采用 3S 技术进行调查登记，并借助专家咨询、民意测验等公众参与的方法来弥补数据的不足。

(2) 生态评价

生态评价是运用复合生态系统的观点及生态学、环境学的理论与技术方法，对规划区域的资源与环境性能、生态过程特征、生态环境敏感性与稳定性进行综合分析评价，以明确规划区域的环境资源生态潜力和制约。

1) 生态过程分析。由于人类活动的影响，使人工生态系统的物能流过程具有很强

的人为特征，表现在：一是人工生态系统的营养结构简化，自然能流的结构和通量被改变，而且生产者、消费者和分解者分离，难以完成物质循环再生和能量的有效利用。二是人工生态系统及景观格局发生改变，使物能流过程人工化。三是辅助物质与能量投入大量增加，使系统变的更加开放。比如农业依赖于化肥的大量投入、工业依赖于区外大量物料的输入等。四是工农业生产使自然物流过程失去平衡，导致水土流失、土地退化加剧。并且人工物流过程不完全，导致有害废弃物积累、大气污染、全球变化、水体污染等生态环境问题。通过对人工生态系统物能流的分析，可进一步认识环境与社会经济发展的关系。

2）生态潜力分析。生态潜力是指单位面积上可能达到的初级生产水平。它是一个综合反映光、热、水、土资源综合配置效果的定量指标，包括光合生产潜力、光温生产潜力、气候生产潜力和土地承载力 4 个层次。其中，光合、光温和气候生产潜力主要针对区域自然生态系统的生态潜力与生态效率特征，它反映了区域气候资源潜力，是区域农业生产的基础。区域土地承载力是区域农业土地资源和农业生产特征的综合体现。通过分析区域生态潜力，可为区域发展规划提供科学依据。

3）生态敏感度分析。不同生态系统或景观斑块对人类活动干扰的反应结果是不同的，有的生态系统对干扰具有较强的抵抗力，可尽快恢复其结构与功能；有的则很脆弱，容易受到损害或破坏，恢复起来很困难。生态敏感度分析就是分析与评价区域内各生态系统对人类活动的反应，分析内容包括水土流失评价、敏感集水区的确定、具有特殊价值的子生态系统及人文景观以及自然灾害的风险评价等。

4）土地质量及区位评价。区域气候条件、地理位置、生态过程特征及社会经济基础综合反映在区域土地质量的分异与区位特征上。因此，土地质量及区位评价实际上是对区域人工生态系统评价分析的综合和归纳。区位评价主要目的是为区域规划、产业发展规划等提供依据。区位评价的指标主要有地质地貌条件、河流水系分布、土壤、植被、 交通、人口、工农业产值等。将这些指标用机理模型或加权法等进行综合，便可对区域土地质量及区位进行评价。

2. 环境容量和生态适宜度分析

环境容量是指在人类生存、自然生态不致受损的前提下，在环境质量标准的约束下，某一环境所能容纳的污染物的最大负荷量。包括大气环境容量、水环境容量、土壤环境容量和绿地环境容量等。生态适宜度是指在规划区内确定的土地利用方式对生态因素的影响程度(生态因素对给定的土地利用方式的适宜状况和程度)，是土地开发利用适宜程度的依据。通过环境容量和生态适宜度分析，可为生态规划中控制污染物的总量排放、加强生态功能区建设和制定土地利用规划等提供科学依据。

生态适宜度分析是在网格调查的基础上，对所有网格进行生态分析和分类，将生态状况相近的作为一类，计算每种类型的网格数以及在总网格中所占的百分比。

(1) 生态适宜度分析程序

根据刘天齐等(1990)的研究，可将生态适宜度分析程序分为 6 个步骤(图 18-10)。

1）明确生态规划区范围和规划范围内可能存在的土地利用方式。在明确生态规划

区范围的基础上，将规划区划分成网格，一般是 $1km^2$ 为一个网格；并说明各网格内可能存在的土地利用方式或土地利用类型。

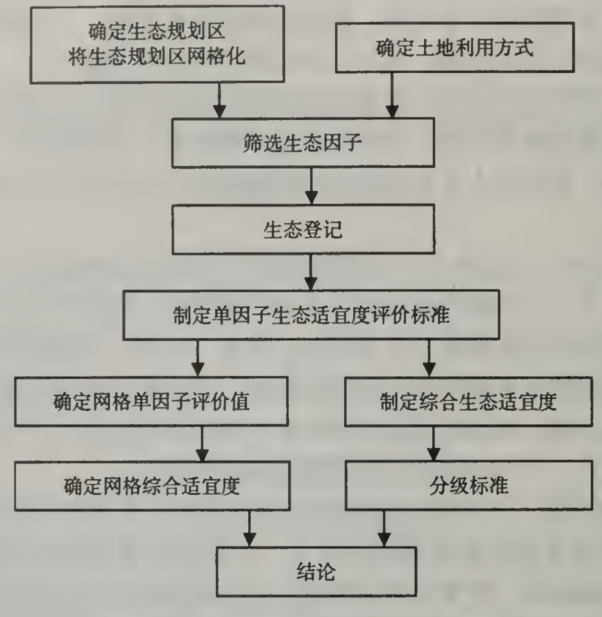


图 18-10　生态适宜度分析程序

2) 用特尔斐(Delphi)法进行筛选。用特尔斐法分别筛选出对各种土地利用方式(类型)有显著影响的生态因子及其影响作用的相对大小，即权重。

3) 进行生态登记。即对生态规划区的各网格分别进行生态登记。

4) 制定生态适宜度评价标准。根据各生态要素对给定的土地利用方式的生态影响规律制定出单因子生态适宜度评价标准，在此基础上应用一定的数学方法，并结合本地实际制定出区内土地对给定土地利用方式的综合适宜度评价标准。

5) 计算生态适宜度综合评价值。根据上述工作成果，首先确定单因子生态适宜度评价值，然后应用特定的数学模型由单因子生态适宜度评价值或评分计算出给定土地利用方式的生态适宜度综合评价值。但应注意，这里所用的特定数学模型必须与第 4 步所使用的数学模型一致。

6) 编制生态适宜度图表。编制生态规划区生态适宜度综合评价表，同时给出每一种土地利用方式的生态适宜度图。

(2) 筛选生态适宜度评价因子的原则

1) 所选择的生态因子对给定的利用方式具有较显著的影响。

2) 所选择的生态因子在各个网格的分布上存在着较显著的差异性。

(3) 生态适宜度单因子评价标准

1) 生态适宜度单因子评价标准的制定依据。生态适宜度单因子评价标准的制定依据主要有两条，即生态因子(单因子)对给定的土地利用方式(土地利用类型)的影响作用规律、规划区的具体情况，即该生态要素在生态规划区的时空分布状况及该生态规划区的社会、经济等有关指标。

2) 生态适宜度单因子评价分级。通常分为 3 级(适宜、基本适宜、不适宜)、5 级(很适宜、适宜、基本适宜、基本不适宜、不适宜)或 6 级(很适宜、适宜、基本适宜、基本不适宜、不适宜、很不适宜)。

(4) 生态适宜度综合评价值

计算生态适宜度综合评价值的公式有以下几种：

1) 代数和表达式

$$B_{ij}=\sum_{s=1}^{n}B_{isj}$$

式中：I 为网格编号(或地块编号)；j 为土地利用方式编号(或土地类型编号)；s 为影响土地利用方式(或土地类型)的生态因子编号；n 为影响土地利用方式(或土地类型)的生态因子总个数；B_{isj} 为土地利用方式为 j 的第 i 个网格的第 s 个生态因子对该利用方式(或类型)的适宜度评价值(简称单因子 s 的评价值)；B_{ij} 为第 i 个网格，其利用方式是 j 时的综合评价值。

2) 算术平均值表达式

$$B_{ij}=\frac{1}{n}\sum_{s=1}^{n}B_{isj}$$

式中各符号含义同上式。

3) 加权平均值表达式

$$B_{ij}=W_s\cdot B_{isj}/W_s$$

式中：W_s：第 s 个生态因子的权值，其余符号含义同上。

(5) 生态适宜度综合评价标准

1) 生态适宜度综合评价标准的制定依据。主要有单因子生态适宜度评价标准、生态规划区生态适宜度综合评价值、该区域社会经济发展规划、该区域总体规划等依据。

2) 制定生态适宜度综合评价标准的方法。制定生态适宜度综合评价标准的方法很多，在实际中根据需要可灵活选择。比如某市经过专家咨询筛选出来的对工业用地适宜度有影响的生态因子共有 5 个，分别用 A、B、C、D、E 表示。其单因子生态适宜度分级标准如表 18-4。其权重分别是 A 为 0.50、B 为 0.20、C 为 0.15、D 为 0.10、E 为 0.05。

表 18-4 单因子生态适宜度分级标准

适宜度等级 \ 生态因子	A	B	C	D	E
很适宜	9	9	9	9	9
适宜	7	7	7	7	7
基本适宜	5	5	5	5	5
基本不适宜	3	5	5	5	5
不适宜	1	1	1	1	1

由单因子评价值合成综合评价值时采用加权平均数模型，即

$$B_{ij} = \sum_{i=1}^{n} W_s \cdot B_{isj} / \sum_{i=1}^{n} W_s$$

式中：$\sum_{s=1}^{n} W_S = 1.0$。

综合生态适宜度的每一级都和一个评价值区间相对应，所以寻找各区间的端点或上下界是判断综合生态适宜度分级标准的关键。考虑到该区域实际情况，各级界限选择情况如表 18-5。其中界限的选择方法各地根据实际情况可以灵活掌握，比如适宜的上级可定为 A、B、C 很适宜，D，E 适宜。其他方法可以类似考虑。

表 18-5　生态适宜度分级界限

状态描述	A、B、D、C、E 均很适宜	A、B、D、E 均很适宜 C 适宜	A、B、D、C、E 均适宜	A、B、D、C、E 均基本适宜	A、B、D、C、E 均基本不适宜	A、B、D、C、E 均不适宜
单因子评价值	A=B=C=D=E=9	A=B=D=9 C=7	A=B=C=D=E=7	A=B=C=D=E=5	A=B=C=D=E=3	A=B=C=D=E=1
综合评价值	9	8.7	7	5	3	1
界限	很适宜的上界	适宜的上界	基本适宜的上界	基本不适宜的上界	不适宜的上界	不适宜的下界

分级结果如图 18-11 所示。

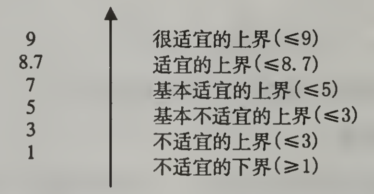


图 18-11　综合评价标准分级

3. 评价指标体系的建立及规划目标的研究

在生态规划中的评价指标体系与规划目标包括以下内容：

1）评价指标体系。评价指标体系是描述和评价某种事物的可量度参数的集合，应充分体现其科学性、综合性、层次性、简洁完备性等原则，根据人工生态系统的特点，采用特尔斐法和多目标决策法，在借鉴传统指标的同时，结合生态系统开放性的特点，从协调社会经济发展与环境保护的关系着手，充分发挥人对复杂系统的辨识能力，在各类分指标的权重中，重点考虑人口密度、土地利用强度、绿地覆盖度、人均公共绿地、建筑密度、经济密度、能耗强度与密度、污染负荷密度、交通量等。

2）规划目标和年度。确定生态规划的总目标、近远期目标和年度，应同区域规划近远期目标和相应的年度一致，以利于同步、协调、可比和互为利用。

（五）主要生态规划类型

1. 生态功能区规划

生态功能区划是根据区域生态系统的结构和功能，将其划分为不同类型的单元，研究其特点、结构、环境污染、环境负荷以及承载力等问题，为各类生态区提供管理对策。生态功能区划是进行生态规划的基础工作，区划的方法可采用聚类分析法。

生态功能区划应遵循 3 条原则，即有利于社会经济发展、有利于居民生活、有利于生态环境建设，力求实现社会、经济与生态效益的统一。

生态功能区划应综合考虑生态要素的现状、问题、发展趋势及生态适宜度，提出工业、农业、社区、交通、仓储、公共绿地、游乐等功能区的综合划分以及大型生态工程的方案，充分发挥生态要素的服务功能，使之朝良性方向发展。

2. 土地利用规划

土地利用空间配置直接影响生态环境的质量优劣，因此，在生态规划中，应按照规划的总体要求，调整用地结构，搞好土地利用规划，发挥土地的最大效用。

1）确定各类用地的选择与划分标准。根据生态适宜度分析结果，确定各类用地的选择与划分标准，同时要兼顾国家有关政策、法规及经济、技术的可行性。在适当标准指导下，结合生态适宜度、土地条件等评价结果，划分各类用地的范围、位置和大小。

2）确定各类用地的开发次序。在充分考虑土地条件的前提下，按照生态适宜度的等级以及经济技术水平，确定各类用地的开发次序标准。根据拟定的标准，确定各类土地的开发次序，搞好土地利用规划，发挥土地的最大生产潜力。

3. 环境规划

环境规划是人类为使环境与社会经济协调发展而对自身活动和环境所做的时间和空间的合理安排。环境规划是实行环境目标管理的基本依据，是国家环境保护政策的具体体现，是生态规划中最重要的组成部分，是协调人与环境、经济与环境关系的重要手段。在环境规划中应遵循两条基本原则，即利用与保护相结合，因地制宜、突出重点的原则。

环境规划的类型多样、内容丰富。根据环境规划的特征，可将其分为不同类型。比如按生态要素分类，可分为生态环境规划和污染防治规划两大类。生态环境规划又可分为自然资源保护规划、生物多样性保护规划、自然保护区规划等。环境污染防治规划又可分为大气环境综合整治规划、水环境综合整治规划、固体废弃物综合整治规划、其他物理污染整治规划等。按管理层次分类，可分为国家环境规划、省级环境规划、城市环境规划、县(区)环境规划、乡镇环境规划、企业环境规划等。

4. 人口适宜容量规划

人既是生产者，又是消费者，是生产力诸要素中最积极、最活跃的部分。人类的生产生活对生态系统的发展起着决定性的作用。因此，在生态规划中，应重视搞好人口适

宜容量规划，加强人口管理，提高人口素质，促进人口的可持续发展。

人口适宜容量规划的内容包括人口密度、规模、自然增长率、性别比、人口分布与迁移、人口素质、人口控制等。

5. 产业发展规划

产业结构是区域经济结构的主体，深刻影响着区域生态系统的结构与功能，为促进物质良性循环和能量高效利用，在生态规划中，应抓好产业规划建设，推动产业结构的转换与升级，加强生态产业建设，推行清洁生产工艺，使原材料得到多级利用，减少资源浪费和环境污染，促进生态系统的可持续发展。

第七节　可持续生态体系建设

一、自然资源的可持续利用

自然资源是指在一定的时间、地点和条件下，能够产生经济价值以提高人类当前和未来福利的自然环境因素，包括土地资源、水资源、气候资源、生物资源、矿产资源等种类。自然资源的开发利用对推动人类文明进程和促进生产力发展具有至关重要的作用。

（一）自然资源的自然属性

1）整体性和有限性。各种自然要素都有不同程度的相互联系，形成有机整体。并且，自然资源的规模和容量具有一定限度。它决定了自然资源的可垄断性、重要性。

2）多用性。自然资源具有多种用途，随着社会经济技术的发展，自然资源的用途在不断拓宽，比如河流资源，不仅具有防洪、灌溉、发电、运输、排水、养殖等功能，而且随着文明的提升，具有了调节气候、净化空气、水质、娱乐、旅游等多种综合功能。

3）区域性。自然资源的空间分布很不均衡。有的地方富集，有的地方贫乏。这一特征决定了自然资源在开发利用中要注意区域间的流通、平等。

4）差异性。自然资源分为可再生自然资源和不可再生(可耗竭)自然资源两大类，不可再生自然资源又可分为可更新自然资源和不可更新自然资源两类(图 18-12)。

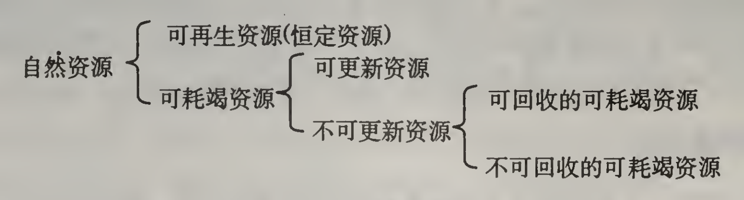


图 18-12　自然资源分类

(二) 自然资源开发利用的发展趋势

随着生产力水平的提高，自然资源的开发利用重点由土地、气候、水、生物等可更新的资源转向以矿产资源为主的不可再生的耗竭性资源(表 18-6)，加剧了资源与发展的矛盾。

表 18-6　不同发展阶段自然资源开发利用的重点

	前发展阶段	低发展阶段	中发展阶段	高发展阶段
时代标志	农业革命之前	农业革命之后	工业革命之后	信息革命之后
经济水平及特征	低水平，采集渔猎，融于天然食物链中	初级水平，自给型经济，简单再生产	中级水平，商品经济，复杂再生产	高级水平，商品经济，向协调型发展
主导产业	无	第一产业	第二产业	第三产业
重点工业部门	无	农副产品加工，冶炼、烧制等手工业	重工业	知识技术密集型轻工业
能源动力类型	人力	人力、畜力及木材、木炭、水能等简单天然动力	煤、石油、天然气及电能等	清洁与可替代能源
起主导作用的自然资源	气候、水、生物等	农业自然资源(土地、气候、水、生物等)	工业自然资源(矿产、水等)	自然环境资源（水、土、大气等)
对当地自然资源的依赖程度	极强	强	较强	减弱

(三) 自然资源可持续利用的基本原则

1) 有偿使用原则。长期以来，受“资源无价”观念的影响，人们对自然资源进行掠夺式开发，无偿使用，造成资源的严重破坏与浪费。这不仅加速了资源的枯竭，也给环境造成了极大压力，严重阻碍了可持续发展。为促进资源的合理开发和节约利用，不少学者提出了对自然资源进行有偿使用的办法，依靠价格这个有力的调节杠杆，建立和完善资源产品和资源市场，将自然资源视为自然资本加以利用和管理，提高其利用率。

2) 开发利用与保护相结合原则。树立资源产权观念，建立资源资产管理制度，加强产权管理，实行所有权与使用权分离，对资源使用实行有偿使用和转让。坚持开发利用与保护相结合的原则。

3) 可持续利用原则。自然资源作为生态系统的组成要素，其开发利用必须遵循生态规律，保持生态系统的良性循环。在不同时期配置和利用自然资源时，做到资源利用净效益的现值最大化， 这是实现高效率资源配置的核心。

4) 节约资源、综合利用原则。资源并非是取之不尽、用之不竭的，即资源是有限的。为合理利用资源，提高利用率，应建立资源节约型的宏观经济调控体系，依靠科技，提高资源的综合利用水平。

(四) 自然资源可持续利用的对策

1. 处理好资源开发与保护的关系

处理好资源开发与保护的关系，是实现自然资源可持续利用的根本问题。对于不可更新的耗竭性资源，比如矿产资源，开发的关键是寻求最优开采率，并增加重复利用率，扩大综合利用和清洁生产。对于目前尚不具备开采价值的贫矿或在目前技术水平下尚难于开发的矿产，要先进行战略性保护，根据需要安排使用顺序，实现可耗竭性资源的最优耗竭。同时，要积极寻求使用可更新资源替代耗竭性资源，特别是要加强对太阳能、风能、潮汐能等资源的有效利用研究。对于可更新资源，比如水、生物等，切忌掠夺性索取，其开发的关键是要合理调控资源使用率，使生态过程与经济过程协调运行，达到生态系统良性循环，保护它们的再生能力。据此，不可再生资源的最优开采系统为

$$H = PY_t - c(Y_t\ ,\ X_t) - WY_t$$

式中：H 为净效益现值；P 为资源的单位价格；Y_t 为资源开采量(t 时)；X_t 为 t 时资源开采量(存量)；$c(Y_t,\ X_t)$为 t 时资源开采成本；W 为资源开采量变化单位的租金或使用费。

可再生资源的最优开采系统为

$$H = PY_t - c(Y_t,\ X_t) + W[g(X_t) - Y_t]$$

式中：$g(X_t)$为可再生资源开采量(存量)的增长函数，其余符号同上。

2. 强化自然资源管理

教育全体公民自觉树立资源保护意识，珍惜和合理利用自然资源。加强资源开发利用与保护的法制建设，依法坚决制止破坏和浪费资源的行为。制定合理的资源开发利用与保护规划，建立资源管理档案，强化资源管理。加强自然资源开发项目的环境管理制度，坚持开发与保护并重，增加资源开发利用的技术含量。实施资源有偿占用、有偿开采制度，发挥市场对资源的配置作用。推行资源可持续利用评价制度，对资源开发利用和保护的政策、规划等进行科学评估，为资源开发提供依据。依靠科技，建立资源节约型国民经济体系，实现资源可持续利用。

3. 建立自然资源保护区

对珍稀资源的保护要采取建立自然保护区的手段。比如珍稀物种、地质地貌、水源地、典型生态系统等都应建立自然保护区，加强自然资源及其生态作用的相关研究，以便合理开发利用自然资源，使珍稀资源得以永续利用。

二、生态环境保护与可持续发展

(一) 生态环境的作用

1) 提供人类活动不可缺少的各种自然资源。
2) 消纳、同化人类活动产生的废物和废能量。
3) 提供人类生存的舒适环境。

(二) 生态环境问题的实质

能源危机、资源耗竭、大气污染、臭氧层破坏、全球变化等这些困扰着人类的生态环境问题的产生，其实质在于人类经济活动索取资源的速度超过了资源本身及其替代品的再生速度和向环境排放废弃物的数量超过了环境的自净能力。因为，生态环境的容量是有限的，废弃物的排放不能超过环境的最大阈限。并且自然资源的补给、再生和增殖需要时间，一旦超过了极限，要想恢复是相当困难的，有时甚至是不可逆转的。比如过度砍伐森林导致的生物多样性减少和物种灭绝，就是一种永久性的损失。

(三) 可持续发展与生态环境保护的关系

可持续发展与生态环境保护两者是密不可分的，要实现可持续发展就必须维护和改善人类赖以生存和发展的生态环境，环境保护是可持续发展的关键。同时，生态环境保护也离不开可持续发展。因为生态环境问题产生于经济过程中，也要解决于经济过程中。

(四) 生态环境保护的对策

1) 强化政府的生态环境监控职能。深入开展环境教育，提高全体公民的生态环境意识。加强生态环境立法、执法等生态环境法制建设，依法管理生态环境。制定社会、经济与环境综合决策，把生态环境保护与其他政策的制定和执行结合起来，提高政策效能。加大生态环境保护行政监督力度，推动科技进步，培育环保产业市场，为解决生态环境问题提供科技服务。引入市场机制，重视经济手段。积极培育环境资源市场，采取排污收费制度、排污权制度等经济手段， 建立生态环境基金，真正做到在经济发展过程中解决生态环境问题。

2) 鼓励企业善待生态环境的行为。企业是各种污染物的产生者和排放者，为保护生态环境，防污减污，企业必须转变观念，摒弃“生态环境保护不经济”的观念，积极倡导绿色工业，增加资金投入，改进生产工艺，建立无(少)废工艺系统，实行清洁生产，加强废弃物无害化处理和循环利用，提高资源利用率。采取切实有效的措施，尽可能地削减排污量，实施产业生态工程，推动环保产业的发展，实现社会、经济和生态效

益的统一。

3) 提高公众意识，规范公众行为。保护生态环境，人人有责。公众既是消费者，有是生产者，其行为在很多方面影响着环境。因此，规范公众对待环境的行为十分重要。要加大生态环境教育力度，大力开展全民环保教育，提高公众环境意识和可持续发展意识。加强舆论监督，坚决制止破坏生态环境的行为。同时，要积极鼓励公众购买生态标志商品，转变消费模式，进行可持续消费。

三、人口与可持续发展

(一) 人口增长对环境的压力

人口问题是当前人类可持续发展亟待解决的首要问题，是古老的新话题。早在1798 年马尔萨斯的《人口论》以及 1972 年罗马俱乐部发表的《增长的极限》报告就指出，如果地球人口继续以现在的速度增长的话，势必造成地球生态系统的崩溃。然而，不幸的是人类当时并没有意识到这一问题的严重性。20 世纪 70 年代以来，世界人口的急剧增长，给地球生态环境造成了巨大压力。

(二) 可持续发展的中心是人

1994 年联合国在开罗召开的人口与发展会议，明确提出“可持续发展的中心是人”，肯定了人口在可持续发展中的重要地位与作用，强调发展所面临的问题是如何满足当代人的需求，改善生活质量，又不损害后代人满足其需求的能力。由于可持续发展涉及人口、资源、环境、经济和社会各个方面，因此要充分认识和妥善处理各项因素之间的关系，使之协调一致，达到互动平衡。

可持续发展在纵向方面所面临的是在不危及后代人满足其生存与幸福的能力的前提下，满足当代人的现实需求。也即该发展所要解决的核心问题是满足人类需求的代际矛盾。在横向方面所强调的是该发展不仅仅是经济指标的增长，而且是经济、社会、人口、资源、环境等各个系统、各个要素协同并进的总体发展以及人的全面发展。人是发展的核心和目标，其他方面的发展都是为人的发展和协调人-社会-自然关系服务的。可持续发展从时间上看，它是世代延续不绝的发展，而不是以维护今天的利益去损害明天的发展。从空间上看，它不是以牺牲整体利益来求得局部利益的发展，而是融局部利益与整体利益为一体的发展。从发展方式看，它不是片面的单一式发展，而是各系统和各要素的协调发展。从发展的类型看，它是内涵式发展，是全面提高国民经济整体素质和人类生活质量，保护和改善生活环境的发展。如果以人口为中心，将人口与其他要素的可持续发展分别定位的话，则人口与社会的可持续发展是目的，人口与经济的可持续发展是基础，人口与资源的可持续发展是前提，从而实现人口与社会、经济、环境的全面可持续发展。

（三）可持续发展的人口对策

1) 控制人口数量。改变传统的生育观念，实施生育节制。通过教育、宣传、立法等国家人口干预过程，积极控制人口增长。改善医疗条件和儿童营养状况，提高婴儿存活率。建立和完善社会养老保险制度，加大社会保障力度，解决老年人口的后顾之忧。

2) 提高人口质量。提倡优生优育，提高人口素质。加大教育投入，大力发展科技教育，提高人口的科学文化素质。

3) 转变消费方式。加快环境教育，树立生态环境保护意识。加大扶贫力度，改变传统的生活方式与消费观念，积极鼓励绿色消费，使人口、资源和环境协调发展。

四、科技进步与可持续发展

（一）科技进步对实现可持续发展的意义

当今，全球尤其是发展中国家在实现可持续发展战略中，如何处理保护环境质量与经济发展之间的矛盾在很长时间内面临着一种两难的境地。解决经济发展与保护环境的矛盾，最有希望的途径是依靠科技进步。从某种意义上讲，人类活动对环境的影响主要取决于人口、经济增长和科技之间的相互关系。这种关系可表达为

$$环境污染=排污系数\times人均收入水平\times人口总量$$

式中，污染被理解为环境退化的状态，它的形成可视为经济活动的污染强度或排污系数(污染/GDP)、人均收入水平(GDP/人口总量)和人口总量三个变量综合作用的结果。从原理上讲，抑制环境退化加剧的趋势可以分别从上述三个变量入手，即降低污染强度、减少人均收入或减慢人均收入上升的速度和控制人口。就人口变量来说，无论是对全球还是对中国，即使采取最严格的人口控制措施，由于增长的惯性，在相当长的时间内减少人口数量难以奏效。就人均收入水平变量来说，发展是一个不可阻挡的历史潮流，减少人均收入或减慢人均收入水平上升的速度的做法并不现实。因此，最可行的办法就是调节经济活动的污染强度，使之大幅度降低，从而实现在人口增长、人均收入水平提高的情况下抑制环境退化的目标，这正是可持续发展追求的境界。大幅度降低污染强度的目标，在相当程度上只能依靠科技进步来实现。

人类的发展历史表明，科技进步在改变人类进程和命运中具有伟大而神奇的力量。在人类的发展历史中，曾发生过三次全球性的重大技术革命，自从 1776 年出现蒸汽机，发生第一次技术革命以后，世界就发生了激烈的变化，开始了工业革命，使人类社会发展从落后的农业小生产进入机器大生产阶段。19 世纪 70 年代至 20 世纪的第二次技术革命，发电机、电动机的出现，加速了工业革命的进程。技术进步的作用无论从影响的程度上还是从渗透的广度上都发生了质的变化，那时，谁先进入工业革命与完成工业革命，谁就优先发展起来，可见技术进步对推动经济增长的巨大作用。20 世纪 40

年代开始的第三次技术革命，是以微电子科学与电子信息技术为特征的高技术革命，极大地推动了社会经济的发展。今天，在人类面临环境退化与经济发展两难境地，寻求可持续发展的新的历史时刻，希望再一次寄托在科技发展上。科技进步是人类摆脱人口、资源、环境恶性循环，实现可持续发展的惟一选择。但是，科学技术是双刃剑，运用不当也会带来灭顶之灾。为减少科技风险，人类应选择有利于环境的技术，即绿色技术。

（二）绿色技术的特征与先进性

1) 模仿自然本身的特征。绿色技术是模拟自然界物质循环和能量流转过程，具有节约资源、与环境友好的特征，它既能满足当代人的消费需求而又不损害后代人的希望，能够被所有的人永久使用而不会造成资源枯竭或在环境方面造成无法承受的后果。

2) 以安全、可再生能源为基础。人类正在研发的新能源获取与储存技术(比如太阳能、核能、风能、地热能等技术)，清洁生产技术等，以安全、可再生能源为基础，可高效利用能源和资源，既不污染环境，又可产生巨大的经济效益。

3) 资源综合利用。生态技术和生态工艺是注重生产过程中物质和能量多层次分级利用、物质全部循环的产业技术系统。它强调各企业的合作与工业共生体系建设，组成工业生态链，使资源得到最优化利用，特别是相互利用废料和副产品，使污染减少到最低限度，实现工业生态系统的最佳运行。

4) 智能化。随着信息技术的高速发展，人工智能正在越来越多地被植入到各项生态技术和环保技术中，从绿色冰箱、空调到工业程序自动化控制，智能化绿色技术已广泛深入到社会生活的方方面面。

5) 充满活力。生态学家托德描绘了生态工程学的一个新领域和一个新的技术范畴——“活的机器”的出现。活的机器由多种类型的有机体和先进的结构材料组成，经过设计可以在各个领域发挥巨大作用，比如废物处理和水的净化等。活的机器模拟自然生态系统本身的规律进行设计，显示出了与众不同的充满活力的特点，比如自动修复、自动设计等，可以很好地适应不断变化的环境条件。

（三）科技发展对策

科学技术是第一生产力，科技进步，尤其是绿色技术的发展，为人类摆脱生存困境，走向可持续发展的未来描绘了一幅美好的蓝图。然而，要实现这一宏伟目标，尚需全人类共同努力，进一步加强科技建设，推动科技进步与社会经济发展和环境保护的结合。

1) 建立可持续发展的科技体系。加强可持续发展高新技术研究，加大科技投入力度，积极发展清洁生产技术、信息技术、生物工程、纳米技术、洁净煤技术、荒漠化防治技术、废弃物再生技术、防灾减灾技术、3S 技术、海洋生物技术、生态系统管理技术等。

2) 推动技术创新与科技经济一体化发展。利用绿色技术，加快传统产业的技术改

造和升级换代，积极推动环保产业、资源综合利用等一批相关产业的发展，建立资源节约型的国民经济和社会发展体系，促进科技经济一体化发展。

3) 加强科技交流与合作。加强国内外科技交流与合作，促进跨学科、跨领域的科研人员的交流与合作，及时沟通国内外的科技信息，促进科研、教学与产业的交流与协作，推动科技成果的转化与应用。

4) 加强科技宣传普及工作。加强科普宣传与教育，举办各种类型的培训班，提高全体公民的科学文化水平和科技意识，形成全社会尊重科学、崇尚科学的良好氛围，推动先进科学技术的应用。

(四) 对可持续发展具有重要意义的技术领域

美国世界资源研究所的学者在广泛研究的基础上，提出了 12 个对可持续发展具有重要意义的技术领域，并根据可持续科技成果的识别标准(该科技成果的运用可带来环境风险的显著下降并达到费用—效果的优化、具有显著的科技进步含义、在技术寿命的研发阶段就应显示出具有一般通用性、具有足够大的社会效益)，对这些技术领域的重要性进行了评价(表 18-7)。

表 18-7　关于主要技术领域对可持续发展重要性的评价

主要技术领域	评价有关技术重要性的标准			
	降低环境风险	技术进步	预竞争阶段一般可用性	社会与个别厂商所获效益比
能源获取技术	++	+	+	+
能源储备技术	+	+		+
能源最终使用技术、	++			++
农业生物技术	+	++		
替代与精细农业技术		+	++	+
制造模拟、监测与控制技术	+	+	++	
催化剂技术		+	++	
分离技术	+		++	
精密制作技术			++	
材料技术	+		++	
信息技术			++	+
避孕技术	++	+		++

注：“+ + ”表示某类技术对某项判断标准具有特别重要的意义；“+ ”表示某类技术对某项判断标准具有比较重要的意义；空白则表示在某项标准衡量下，对应技术的重要性并不显著。

引自 Heaton et al.　1991

五、防灾减灾与可持续发展

自然灾害是人类社会发展过程中遇到的一种自然现象，其后果是造成社会功能的严

重破坏和生命财产的巨大损失，严重影响着社会发展进程，全球每年的自然灾害损失高达 500 亿美元。因此，在可持续发展中必须认真对待和研究灾害问题。

(一) 人类面临的主要自然灾害

自然灾害的种类很多，成因也各不相同。1989 年联合国“国际减轻自然灾害十年报告”提出的 10 种自然灾害为：地震、海啸、滑坡、雪崩、洪水、野火、干旱、火山喷发、蝗虫侵害、热带气旋及其他风暴。根据成因，自然灾害可大致分为以下 4 类：

1. 地质灾害

1) 地震。地震是地壳运动的一种形式，是地壳将积累的应力能在瞬间释放而产生的地表剧烈震动。从成因看，地震可分为构造地震、火山地震、塌陷地震等类型。衡量地震大小及其危害的指标是震级和烈度。其中，震级是表示地震强弱的指标，分 1~9 级。5 级以上地震可引起不同程度的破坏，称破坏性地震。7 级以上称强地震。烈度是地震对地面运动影响的强烈程度，一般分为 1~12 度。烈度大小与震级、震中距离远近等直接相关。通常，震级越大，烈度越大。全球每年大约有 1679 万次地震，具有破坏性的地震有千余次，造成严重灾害的有十几次，损失惨重。比如 1995 年日本阪神 7.2 级地震，造成死亡人数 5200 多人，伤残 2.68 万人，直接经济损失 1000 亿美元。显然，地震对人类文明进程造成的损失和打击是巨大的。

2) 滑坡。滑坡是指边坡岩体在重力和水流作用下做整体向下滑动的现象。滑坡多发生在山区及河流岸边的松散土层中，其速度和大小不等。滑坡现象的发生与下雨有着密切关系，人们形容为“大雨大滑、小雨小滑、无雨不滑”。一些崩塌性滑坡对工农业生产的影响很大。

3) 泥石流。泥石流是指突然爆发的饱含大量泥砂、石块的山地洪流。它历时短、来势凶、极具破坏力。世界上大多数国家都发生过泥石流，中国是世界上泥石流危害比较严重的国家之一。

4) 水土流失。水土流失是以水为动力的土壤侵蚀现象，它是气候、地形、植被、土壤等自然因素和人类活动综合作用的结果。水土流失主要发生在缺乏植被、土壤黏性较小的高原地区和山地地带。全世界每年有 300 多万公顷土地毁于水土流失，流失土壤 270 亿 t，水土流失造成土地贫瘠化和沙化、河床抬高、水库淤积、水旱灾害发生频率增多等，对生态环境的危害极大。

2. 气象灾害

1) 热带气旋。热带气旋是在热带海洋上形成的大气低涡的统称。根据其中心最大风力可分成热带低压、热带风暴、强热带风暴、台风或飓风等 4 类。全球平均每年发生 60 多个热带风暴以上的热带气旋，其中西太平洋约占 47%，中国是世界上每年登陆热带风暴最多的国家之一。热带气旋可导致狂风、暴雨等灾害，其特点是突发性强、强度大、群发性显著(多种灾害并发)，比如台风并发暴雨及风暴潮等。

2) 洪涝。洪涝包括洪水泛滥和雨水贮积于地表的现象，它是平原地区重要的致灾原因。世界每年都会发生严重的洪涝灾害，比如 90 年代以来，我国 8 年间发生 5 次大的洪涝灾害，发生频率明显加快，经济损失呈逐步加重的趋势。

3) 干旱。旱灾是世界最常见和分布范围最广的致灾原因，约占自然灾害总量的 60%。我国是世界上干旱危害最严重的国家之一，比如 1951~1990 年，全国平均每年发生旱灾 7.5 次，最多年份达 10~11 次，平均受灾面积 2070 万 hm^2，成灾面积 789 万 hm^2。

3. 海洋灾害

1) 风暴潮。风暴潮是由于强烈的气旋低压引起的潮位异常升高现象，是世界各地沿海地区最严重的海洋灾害的致灾原因。热带气旋、温带气旋等都可以引起风暴潮，其中以台风引起的风暴潮危害最大，比如我国历史上一次风暴潮曾夺去 10 万人的生命(1862 年广州)。

2) 海平面上升。由于全球气温变暖和各种环境问题的影响，海平面正在逐渐上升。海平面上升的结果，引起风暴潮灾害加剧、洪涝威胁增大、海岸侵蚀加速、海水入侵范围扩大、港口及航运功能减弱等一系列问题，对人类生存及环境的影响巨大。

4. 生物灾害

生物灾害中最主要的和危害最大的有鼠害、虫害。据联合国粮农组织统计，1985 年全球鼠害造成的农业损失 170 亿美元。并且，鼠害不仅发生在粮食产区，也出现在林区与牧区，对草场的破坏极大。蝗虫对农作物的危害极大，全球约有 1 万种蝗虫，我国有 800 多种，分布广泛，尤以华北地区最为集中。蝗灾发生多与旱涝有关，在干旱或先涝后旱时极易发生。

(二) 可持续发展的防灾减灾对策

1) 加强灾害预测预报系统建设。加大减灾投入，加强灾害预测预报系统建设。依靠先进的科学技术手段，建立灾害监测网络与管理系统，对灾害进行长期监测与分析研究。重点抓好灾害及破坏机理研究及灾害预报研究工作，提高灾害测报水平和防灾减灾能力。

2) 提高全民防灾减灾意识。积极开展防灾减灾教育，使全体公民树立防灾减灾意识，改变重救灾轻防灾，重治标轻治本的短视行为，加强治本建设。同时，协调人与自然的关系，尊重自然规律，自觉抵制破坏自然的行为，改变不合理的经济增长方式与消费方式。

3) 完善减灾法规。逐步完善灾害管理的法规体系，制定各项减灾法规，比如《减灾基本法》、《消防法》、《防震减灾法》等，通过减灾立法，规范人们的行为。同时要加大减灾执法机构建设，加大执法力度，依法减灾。

4) 重视科技在减灾中的作用。重视高新技术在生产领域的应用，发展资源节约型

的经济，减少诱导灾害发生的因素。同时，要重视运用先进的科学技术促进防灾减灾工作和灾害管理。广泛开展减灾科技攻关研究，加强国内外防灾减灾学术交流与合作。在减灾工程建设中注重高新技术的渗入，比如 3S 技术在减灾工作中的运用等，提高灾害预测与救援的能力。

六、生物多样性保护

生物多样性是反映地球上所有生物及其生存环境和所包含的组成部分的综合体，包括景观多样性、生态系统多样性、物种多样性和遗传多样性。生物多样性对人类具有不可估量的价值和作用，保护生物多样性是实现可持续发展的重大战略之一。

(一) 人类社会对生物多样性的影响

由于人类传统的发展模式导致人口激增、土地开垦盲目扩大、掠夺式滥用自然资源、工业化和城市化对生态环境的破坏等，引起地球上生物多样性锐减。据估计，目前物种多样性的丧失比自然界本身的速度快了约 1000~10 000 倍，生态系统的破坏也很严重。从生态学的角度看，造成生物多样性退化的机制主要是生境丧失、片段化和退化，生物资源过度利用，引种驯化，环境污染和气候变化等。

(二) 生物多样性保护对策

1) 加强自然保护区建设。加强自然保护区建设，建立和完善自然保护区网络，通过就地保护、迁地保护，将具有代表性的生态系统和珍稀濒危生物及其生境加以保护，并进行适宜的管理。

2) 强化生物多样性管理。制定生物多样性管理政策与法规，寻求合理的管理方法，通过建立生物多样性保护监控系统和搞好生物多样性保护规划，加强对自然保护区、动植物园等的管理。加强执法力度，坚决打击破坏森林、猎杀野生生物、乱采滥挖珍稀植物等的不法行为。

3) 提高全体公民的生物多样性保护意识。加强生物多样性保护重要性的宣传，唤醒人们热爱自然、保护物种的意识，提高对生物多样性保护的自觉性，积极参与保护生物多样性的行动。

4) 大力建设现代化基因库。加大投资力度，加强现代化基因库建设，保护野生物种基因。设立生物多样性研究基金，加强生物多样性保护研究，促进生物资源的可持续利用。

5) 加强国际合作。加强生物多样性保护的国际合作，比如跨国界区域的自然保护、迁徙动物保护、技术与资金的援助与支持、人员的培训与交流、生物多样性的双边合作与交流等。

七、生态示范区建设

(一) 生态示范区的概念与意义

生态示范区是以生态学、经济生态学原理为指导，以协调社会、经济发展和环境保护为主要对象，以实现生态良性循环，社会、经济全面、健康和可持续发展为目标，进行统一规划、综合建设的一定行政区域。生态示范区是一个相对独立、又对外开放的社会-经济-自然复合生态系统。生态示范区建设可以乡、县和市域为基本单位组织实施，目前我国重点建设以县为单位的生态示范区。

生态示范区建设是实施可持续发展战略的最基本的社会经济形式，是落实国策的重要保证和促进环境保护与综合决策结合的主要途径。

(二) 生态示范区的指标体系

生态示范区的指标体系分为 3 个类型，即经济发展指标(1~5)、生态环境指标(6~19)和社会发展指标(21~24)，共计 24 项(表 18-8)。

表 18-8　三类不同地区生态示范区指标

指标		适用地区		
		经济欠发达地区	一般地区	发达地区
经济发展目标	农民人均年纯收入(1995 年价) /元	＞1400	＞2000	＞2500
	农民人均纯收入年均增长 /%	＞7	＞6	＞5
	经济产投比	＞1.5	＞1.9	＞2.5
	产业结构合理程度	因地制宜评估拟定		
	第三产业产值占总产值比例 /%	＞20	＞25	＞30
生态环境	森林覆盖率 /%	达到国家绿化标准		
	退化土地治理率 /%	＞50	＞65	＞80
	资源利用适宜程度	因地制宜评估拟定		
	农村新能源比例 /%	8~15	15~25	10~15
	化肥农药递减率 /%	5~8	8~10	10~15
	农膜回收率 /%	＞60	＞70	＞80
	畜禽粪便处理率(综合利用率) /%	＞80	＞90	100
	生物防治推广率 /%	＞20	＞30	＞40
	企事业单位污染治理达标率 /%	＞60	＞75	＞90
	大气环境质量	不低于二级国家标准		
	水环境质量	按不同功能，分别符合国家标准		
	固体废弃物处置率(综合利用率) /%	＞50	＞70	＞80
	噪音状况	符合 GB 3096-93 规定		
	城镇人均公共绿地	＞7	＞7.5	＞8

续表 18-8

指标		适用地区		
		经济欠发达地区	一般地区	发达地区
社会发展目标	人口自然增长率 /%	符合国家人口政策		
	教育事业发展	实现“普九”教育，部分发展职业教育		积极普及高中教育全面发展职业教育
	每万人中专业技术人员(国民科技素质) /人	＞350	＞400	＞500
	城镇人均住房面积 /m^2	＞10	＞12	＞15
	村镇自来水普及率 /%	40~50	50~60	＞60

(三) 生态示范区的基本模式

根据各地生态环境问题的不同，生态示范区建设可分为区域生态示范区建设和生态破坏恢复治理型示范区建设 2 个类型。

1. 区域生态示范区

(1) 以单项建设为主的生态示范区

1) 生态农业型。生态农业型的生态示范区是以保护农业生态环境，发展农村经济为主要建设内容的生态示范区。通过建设，形成符合生态学原理的优质、高产、高效农业体系。

2) 乡镇工业型。围绕乡镇工业，以经济生态学原理为指导，规划并建设乡镇工业小区，加强管理，集中治理污染，发展绿色产品，促进经济和环境协调发展。

3) 贸工农一体化型。随着农业产业化进程的迅猛发展，农业与工业、商业的关系日益密切，农工商一体化已成为今后发展的大趋势。在这种情况下，积极协调农业与工业、商业的关系，加强生态环境保护，促进社会、经济与生态效益的统一，提高生态系统对可持续发展的支撑能力是这一类型生态示范区建设的主要任务。

4) 生态旅游型。生态旅游示范区以合理开发旅游资源，有效防治生态破坏和旅游污染为主要建设内容。生态旅游以良好的生态环境为资源，坚持开发和保护并重，以旅游业为支柱，通过发展旅游业，带动其他产业的发展和生态环境的改善。

5) 生态城镇型。生态城镇示范区是以改善城镇生态环境和提高居民生活质量，加强生态景观建设和污染防治，实行清洁生产，有效利用资源和能源为主要建设内容。

(2) 以区域综合建设为主的生态示范区

综合生态示范区建设的主要内容是开展城乡生态环境综合整治，根据生态学规律，把经济生态建设、城乡规划建设等有机结合起来，逐步实现全区域社会、经济和生态环境的和谐发展。

2. 生态破坏恢复治理型示范区

有计划地治理和恢复遭到破坏的生态环境，是生态环境保护的重要任务，也是生态示范区建设的主要内容之一。生态破坏恢复治理型示范区主要有 2 种类型，一种是在由

于自然资源开发造成的破坏的地区进行生态恢复，比如矿区、土地退化区等。另一种是环境污染区的生态恢复，比如农村环境的综合整治等。

（四）生态示范区的建设步骤

生态示范区建设大体上可以分为 4 个步骤(图 18-13)。

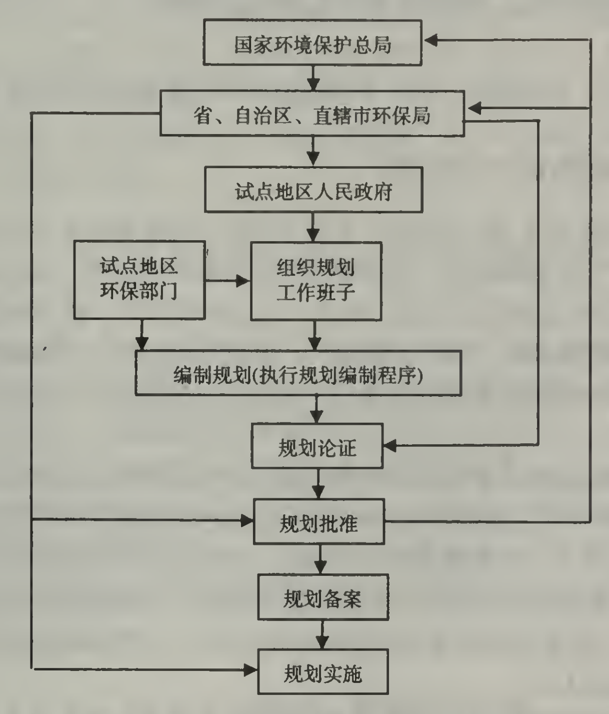


图 18-13　生态示范区建设规划工作程序图

1）编制与审批生态示范区建设规划。请有关专家和专业技术人员编制符合生态学与经济生态学原理的生态示范区建设规划。该规划应是生态环境保护和社会、经济发展相协调的综合规划，以用于指导、规范生态示范区建设。在此基础上，将编制好的规划报请有关部门审批，或以某种政策的形式确定下来，并纳入国民经济和社会发展计划，以保证生态示范区建设纳入当地社会经济的整体发展中。

2）制定实施建设的详细计划。制定实施规划的详细计划，将生态示范区建设指标分解到各行各业，将各项建设任务分解落实到各部门、单位，使之与各部门的工作有机结合起来，融为一体。

3）实施建设。根据计划分阶段逐步进行生态示范区建设。

4）组织检查验收。对生态示范区建设任务的进展情况和建设目标的完成情况及时组织检查验收，总结推广经验，保证该项工作的顺利开展。

第八节　可持续发展的生态对策

一、绿色制度创新：可持续发展制度

可持续发展的制度创新主要体现在强制性制度安排和非强制性制度安排两方面。具体表现为：生态社会主义思想深入人心，绿党地位得以确立，各国政府对其宏观调控目标及政策进行改进和调整，可持续发展的伦理观逐步形成。

(一) 生态社会主义思潮的兴起和绿党地位的确立

1. 生态社会主义与绿党的产生和发展

20 世纪 60 年代末至 80 年代初，在西方兴起一股批评资本主义社会制度下的生态危机，要求建立符合生态环境的、没有剥削的社会制度的思潮，即生态社会主义思潮。80 年代，德国成为生态社会主义的大本营。在这种背景下，西方国家纷纷发起了以保护生态、反对战争和核威胁、维护世界和平、保护人们正当权益为基本内容的社会政治运动，产生了各种各样的生态保护政党——绿党。生态社会主义的发展大体经历了三个阶段：

1) 生态运动崛起阶段。20 世纪 60 年代末至 70 年代初，以罗马俱乐部的诞生为标志，这一 阶段主要代表人物是前东德统一社会党党员巴赫罗和波共意识形态负责人沙夫。巴赫罗的代表作《从红色到绿色》(1983)，主张生态人道主义和民主社会主义，谋求“红色”(共产主义)与“绿色”(生态运动)的统一，主张组成一个由绿党、妇女运动、生态运动和一 切进步的非暴力社会组织参与的广泛群众联盟，因而被誉为“西方社会主义运动的代言人”。

2) 生态运动兴旺发展阶段。20 世纪 80 年代生态运动以从事技术理性批判为主，代表人物是加拿大学者莱易斯和阿格尔。他们把生态危机的根源归结为资本主义制度本身，认为以私有制为基础的资本主义生产扩张的动力是追逐利润，生产的无政府状态所带来的“过度生产”和“过度消费”必然造成生态危机。所以应根据马克思主义的见解，建立一个摆脱异化劳动与异化消费、人与自然和谐并充分发挥人的创造性的“稳态”社会经济模式，寻求一条把马克思主义的异化理论与生态危机理论相结合，并吸引人们参与的生态社会主义道路。

3) 生态运动深化阶段。20 世纪 80 年代末以来生态运动进入了更加深入的政治、经济和文化制度批判的层面。主要代表人物是法国学者拉比尔、英国学者格伦德曼等，他们提出“红色绿党”的概念，要求结合当代生态问题的严重性重新考虑马克思主义，用马克思主义指导生态运动。

2. 生态社会主义的基本思想

1) 经济思想。在经济发展目标上，生态社会主义主张用“经济生态”模式取代现行的“市场经济”模式，建立一种以保护自然、合理利用自然资源、考虑后代人需求为

特征的经济制度，即“稳定经济”。

2) 政治思想。生态社会主义主张，从社会系统的观点出发来看待资本主义国家的政治、经济、社会、文化乃至意识形态和伦理道德方面的弊病，强调在人与人之间、人与自然之间实行自主的、创造性的交往，反对以市场供求确定彼此之间的关系，反对利己主义，倡导社会责任感。

3) 外交思想。主张和平和发展应是外交方针的指导思想，强调进行“社会防御”、“生态防御”，反对和制止军事竞赛和核武器，以维护世界的和平、稳定和发展。

4) 教育思想。认为教育应面向人类社会的协调发展，努力为人类社会的健康发展培养优秀人才，强调通过教育实现以“文化工业”代替“机械工业”过程。

可见，生态社会主义的思想和主张不免有些偏激，但对于目前人类发展面临的种种困境而言，具有一定的指导意义。

（二）政府宏观调控目标的改进及其政策调整

随着《21 世纪议程》在全球形成共识，并得到广泛的支持，世界各国普遍对其宏观调控目标进行了改进：一方面调整单一追求经济增长的发展目标，在政府宏观调控目标体系中增加了环境指标、健康指标等可持续发展指标体系的内容。另一方面研发可持续发展的技术和产品的指标也被列入到政府宏观调控指标体系中。与此同时，围绕宏观调控目标的调整，各国政府普遍采取了三项措施：一是实行环境许可证制度，禁止一切未领取环境许可证的生产和服务行为，以防止污染和保护生态。二是为企业提供环保信息资源，促进环境意识的增强和环境行为的进步。三是采用环保补贴、排污收费等经济手段保护资源和环境。

二、绿色产业创新：发展绿色产业

20 世纪 90 年代以来，西方国家的环保产业方兴未艾，主要表现为生态产业的兴起、工业企业绿色化发展、废弃物再利用、绿色能源开发利用及绿色产品生产等。

（一）生态农业的兴起

传统农业实质上是高投入(机械、化肥、农药等投入)、高产出的不可持续农业。其易导致土壤结构破坏、作物抗灾能力下降、农产品残留毒性增加、环境污染等，影响人类的健康和其他生物的安全与生态平衡。20 世纪 70 年代后，人们逐渐认识到传统农业的种种弊端，试图寻求一种更为理想、安全的农业制度。生态农业应运而生，它的特征是降低能耗、保护资源与环境、提高食物质量等。生态农业是一种农业持续发展的新模式，在欧美等西方国家得到了较快发展。近年来中国生态农业发展迅速，取得了不少成功经验，比如秸秆养畜、林粮间作等高效生态农业模式，值得借鉴。

(二) 生态工业的崛起

1. 工业企业绿色化发展

保护环境，企业有责。一些企业逐渐认识到，保护环境不仅可以节省开支，而且能提高企业竞争力。不少大企业纷纷加入了环保行列，尤其是一些污染严重的企业也自觉地加入了环保行列。比如德国的一些化学工业公司，由原来的污染大户变成了欧洲著名的绿色化企业。环保企业的兴起，一方面是企业为了生存和发展；另一方面是人类环保意识增强，推动了环保产业的发展和环保产品的普及。比如，天然的布料、再生布料、生态服装开始兴起，绿色食品走俏市场，清洁生产技术得到推广与应用等。目前，欧美等发达国家已建立产业生态工程，发展无污染产业，开发环保汽车、清洁能源、有机食品、生态建筑等绿色产品。中国企业也逐渐接受了环保第一的理念，环保产业、环保企业和环保产品正在兴起。

2. 废弃物再利用

随着科技的发展和人们环保意识的增强，废物利用，对“三废”物质(废物、废水、废气)进行资源化处理，回收可利用资源，变废为宝，已成为环保工作的重点。一是对废旧物资进行综合利用。过去废旧物资一直是污染环境的重要因素，而现在人们把它收集起来，进行加工再利用，使之变废为宝，成为社会财富。目前，综合利用“三废”，使之资源化，已成为许多企业提高经济效益、加强环境保护的重要手段。比如德国从钢铁生产的酸溶液中回收硫酸，从罐头工业废弃物中回收醋，从造纸废液中回收化学药品等。利用废旧物资作为生产资源，比开发自然资源进行同样生产，节省资金，并能消除污染、改善环境。以废物利用为主的新兴产业正在世界各地兴起。二是除污防害。面对已被污染和破坏了的生态环境，人类正在采取一切可能的措施减轻对环境污染和生态破坏的程度，并将工作重点放在对大气和水的污染处理上。在大气污染防止方面，针对臭氧层被破坏的问题，积极研制氟氯烃等的替代品。对大气的主要污染源——汽车、工厂排放的烟尘进行重点治理。在水污染方面，利用微生物、细菌等生物降解方法，使污水中的有机物分解成为无毒无害的简单无机物，同时辅以化学方法净化污水，使其得以循环利用。

3. 清洁能源的开发利用

开发利用清洁能源主要体现在以下几方面：一是充分利用太阳能。当今一切能源资源归根到底都是太阳的辐射能。太阳能的开发利用可从根本上改变人类利用能源的状况。二是利用风能。利用风能发电，既没有辐射危险，又不会污染环境，因而受到世界各国的青睐。三是利用地热能和海洋能。除利用潮汐发电外，其他海洋能的利用还处在技术的开发和实验阶段。四是利用水能。水电的生产是利用河水的落差发电，生产过程不会产生污染，开发利用潜力巨大。五是利用沼气。利用生物资源加工后的废料、农作物秸秆、树叶、动物粪便等发酵产生沼气，清洁、卫生、安全，是很好的燃料，是解决农村能源问题的一条有效途径。六是聚变能研发。聚变不会产生放射性污染，且能量极

大，其燃料氘、氚来自水，1000g 氘氚聚变能产生相当于 4000g 铀裂变能或 6600t 汽油、10 000t 煤炭燃烧释放的热量。随着聚变能的研发成功，大海将成为人类取之不尽的能源库。这些绿色能源的开发利用，可以改善能源结构，减少常规能源使用造成的污染，提高环境质量。

4. 绿色产品的开发与研制

20 世纪 80 年代以来，在生产领域得到广泛提倡和应用的“清洁生产”、“污染预防”等一系列方法和技术进一步走向成熟，并发展成为“生态设计”、“绿色产品开发”等一整套全新的理念系统，它主张人类的需求应保持在一个合理的限度内。这个限度就是维持人与自然的协调发展，实现以较少的资源满足人类生存与发展的需求，持续地提高人类的生活水准。同时，倡导一种新的消费模式，防止对自然资源的无效占有和不必要的消费。这一思想在产品设计中表现为：利用最优化原理，用最少的材料、人力和能耗，实现产品最大功能；利用一切工艺手段，尽量提高产品的耐久性，达到节约的目的；注意可再生材料产品的生产。材料的反复利用，既可实现价值的不断增值，又可避免对环境的直接污染。

(三) 生态旅游热

生态旅游是指在不损害野生动植物、不危害环境、不破坏地方风俗和人文古迹的情况下，让游客回归自然、进入自然景区，尽情地欣赏大自然的优美风光，体验在深山密林中远足，在急流险滩跋涉的野趣，使游客既得到了美的享受，又学到了生态知识、陶冶了情操，同时也增强其保护自然的责任感。目前，生态旅游已成为全球旅游业发展的新趋势。

三、消费创新：绿色消费

绿色消费，目前正在世界各地兴起，并逐渐形成一种“保护环境，崇尚自然”的生活理念和时尚。比如，现在日本市场上的牛奶、饮料、酒类等大多已改为纸质包装，法国的食品货架上已看不到塑料、玻璃等难以回收的包装，绝大多数都采用了无菌包装纸盒。同时，绿色消费也已广泛进入人们的生活和家庭。调查显示，77%的美国人表示一个公司的环境信誉度会影响其购买，91.6%的日本人表示对有机蔬菜感兴趣，40%的欧洲人喜欢有机食品。绿色产品备受消费者青睐，越来越多的购物者会考虑是否对环境和健康有利来选购商品。所谓绿色产品是指无污染、无公害的环保产品，包括绿色食品、天然饮料、生态服装、生态住宅、环保用具等，其消费市场在迅速扩大。

各国政府为保证绿色产品的生产和消费，实行了“绿色标志”制度。“绿色标志”是不同于产品商标的一种标签，它用于标明某产品符合环保要求，对生态环境和人体健康无害。“绿色标志”是经专门委员会的专家鉴定由政府有关部门授予。它的评价标准包括含毒量小、排污少、噪音低、废弃物量少、资源循环利用率高等因素。

四、国际协调与合作：加强生态环境保护

随着《里约宣言》等文件的签署，国际社会关于环境保护的国际协调与合作原则得以确立，为建立一种新的全球“伙伴关系”奠定了基础；规定了不同制度的国家和地区，不同信仰、宗教和文化的人们在处理环境问题中的基本权利和义务；并敦促各国政府和公众采取措施，防止生态污染和环境恶化，为保护人类的生存环境共同做出努力。

五、理论创新：可持续发展伦理观形成

随着可持续发展思想的形成和发展，可持续发展伦理观逐步形成，具体内容如下：

(一) 确立人类整体与长远利益目标

在时间上，既要满足当代人的需求又不对后代人的发展构成危害，以保证人类道德的延续和发展。在空间上，既要保障人类的基本生存需求，又要不断提高人类的生活质量，实现人类社会的全面发展。这种价值目标要求人们在追求眼前的、局部的物质利益时必须兼顾整体利益(全球利益)与长远利益(代际间利益)，这样的发展行为才是可持续的，才是符合人类文明进程的伦理规范的。那些损害人类共同利益的极端个人主义、利己主义或群体主义，以及损害后代人利益的资源掠夺行为是人类文明发展进程所不容的。

(二) 强调当代人之间的公平公正意识

由于历史和现实的原因，当今世界存在着巨大的贫富差距。发达国家和地区拥有巨大的财富，他们利用这种优势，用不平等的手段和方式，廉价地利用地球资源。这种不平等的经济行为是不符合人类文明进程的伦理规范的。也即，一部分人的发展不应损害另一部分人的利益，发达国家和地区的人们应履行扶持贫困的责任和义务。消除贫困， 给世界以公正的生存和发展权利，已成为可持续发展进程中必须加以考虑的问题。这既是人道主义的要求，也是人类真正平等的道德要求与道德责任。

(三) 尊重、实现和维持自然价值观

在传统的经济活动中，人类往往只是看到自然资源满足人类物资需求的外在价值和工具价值，以人的利益作为惟一的价值尺度，而忽视自然本身的价值，对自然持一种纯粹功利主义的态度。可持续发展揭示了自然的内在价值，要求人们尊重自然，重新规范对自然的态度和行为，建立一种人与自然互利共生、和谐发展的新型关系。通过寻求科学的资源评估和定位方法，把资源核算纳入国民经济核算体系，并改革自然资源价格体系，用经济手段，实现社会、经济和生态效益的统一。

六、科技创新：建立可持续发展的科技体系

（一）生态建设技术得到重视

生态建设技术承担着实现人与自然协调发展的重担，发挥着开发绿色产品、发展清洁生产、实现自然资源合理开发与循环利用、防治污染、保护和改善生态环境的关键作用。近年来，随着我国生态环境建设步伐的加快，生态建设技术得到了政府以及社会各界的广泛重视。国家先后出台一系列科技发展政策与措施，加大了科技投入力度，鼓励生态建设技术研究，研发清洁生产技术、信息技术、生物工程、纳米技术、洁净煤技术、荒漠化防治技术、废弃物再生技术、防灾减灾技术、3S 技术、海洋生物技术、生态系统管理技术等，为我国生态环境建设提供坚实的技术支持。

（二）积极推动技术创新与科技经济一体化发展

加快科技产业化发展，积极利用环保技术，加快传统产业的技术改造和升级换代，积极推动环保产业、资源综合利用等一批相关产业的发展，加强建立资源节约型的国民经济和社会发展体系，促进科技经济一体化发展。

第十九章　人类生态学

第一节　导　　论

一、人类生态学的概念

在现代生态学众多的分支领域中，人类生态学(human ecology)是最富有现代特征的分支之一。这不但反映在其研究对象的独特和理论的新颖上，更重要的是人类生态学的研究，对于解决当今人类面临的诸多重大生态环境问题具有重要的现实意义。人类生态学作为一门新兴的尚在形成发展中的生态学分支学科，目前它还没有较为一致的定义。由于人类生态学的研究涉及人类自身的自然生态、行为生态、心理、人文地理以及人类的社会、文化、经济甚至哲学等各个方面，因而形成了诸多学派。不同学者由于研究的侧重点不同，因而给出了不同的定义。近年来不少学者认为，人类生态学是研究人类群体与其环境相互关系及其规律的学科。

二、人类生态学的由来

从人类生态学发展的历史渊源看，人类生态学这一科学术语，最早由美国芝加哥学派的代表人物 Park 于 1915 年在其著名论文《城市：对于开展城市环境中人类行为研究的几点意见》中首次提出。他将人类生态学定义为研究人和社会机构的结构秩序及其形成机制的科学。1922 年美国地理学家 Barrows 提出人类生态学是研究人类对自然环境的反映的分支学科，他认为人是中心议题，一切其他现象只是当它们涉及人和它们的反应时才有必要说明。1924 年美国社会生态学家 McKenzie 发表《人类社区研究的生态学方法》，为人类生态学下了一个较为正式的定义，即研究人类在其环境的选择力、分配力和调节力的影响下所形成的在空间和时间上的联系的科学。随后，Bews、Duncan、Odum 等学者又先后发展了人类生态学的概念，提出了许多新的见解，使人类生态学逐渐发展成为一门有自己独特研究内容和系统的学科。

20 世纪 60 年代以来，随着人类活动对自然环境的影响日益深刻和生态环境问题的全球化，人类生态学重新兴起，成为介于自然科学和社会科学之间的边缘科学，研究人口、资源和环境之间的关系。我国著名生态学家马世骏(1989)指出，人类生态学应该发展成为一门以生态学原理为基础，与多种社会科学和自然科学相汇合，以人类生态系统为对象，以优化人类行为决策为中枢，以协调人口、社会、经济、资源、环境相互关系为目标的现代科学。目前，随着全球可持续发展战略的实施，各种人类生态学的国际和区域组织如雨后春笋般在全世界兴起，推动了人类生态学研究的蓬勃发展。

三、人类生态学的研究对象、内容与任务

(一) 人类生态学的研究对象

人类生态学研究的主体和对象是人类生态系统。所谓人类生态系统，是指人类种群与其生存环境相互作用的网络结构，也是人类对自然环境的适应、改造、开发和利用而建立起来的人工生态系统。在这个系统中，一方面环境以其固有的成分及其能流和物流运动着，并制约着人类的活动；另一方面人类的活动，又不断地改变着能流的方向与物质循环的途径。二者相互作用和制约，组成一个复杂的以人为中心的生态系统，即人类生态系统。换言之，人类生态系统是由社会系统、经济系统和自然系统组成的复合体，人是该系统的中心。

(二) 人类生态学的研究内容与任务

由于人类生态学是在适应协调当代人口、资源与环境之间的关系及其发展过程中逐渐形成和发展起来的，因而，当代人口、资源、环境与发展之间在运动中的现实关系，就在客观上确定了人类生态学的主要研究内容。资源与环境既是人类的生存空间和生活场所，又是人类赖以生存的物质基础和进行生产活动的场所。所以，人口、资源、环境三者之间的关系，以人类经济活动为纽带。在研究三者关系时，必须考虑社会经济因素。

从系统科学的观点看，人类生态学是研究一定区域的社会系统、经济系统与生态系统之间的相互作用。具体地，人类生态学的研究内容和任务包括：研究人与环境之间的相互关系及其规律性；研究人类的演化、人种的形成、人口的分布、人类文明的形成、人类文化与自然环境的关系；研究人类种群的结构和增长、人际关系和小群体效应；研究人类生态系统平衡原理，生态危机及人类应有的态度，协调人口、资源与环境的关系，促进人类的可持续发展。当前研究的重点是：人类生态学的理论和方法、人类发展与环境、人类生态系统的结构与功能、人口生态问题、经济生态问题、资源生态问题、环境生态问题和人类生态决策等。

四、人类生态学的研究特征与方法

(一) 人类生态学的研究特征

人类生态学作为一门新兴的学科，其研究特征如下：

1) 综合性。人类生态学是一门跨自然科学与社会科学的综合性学科，它由生态学发展而来，并与社会学相交叉，强调生态规律对人类活动的指导作用，主张从科学、社会、政治等方面来协调和解决人类面临的生态环境问题，促进人类社会与生态环境的协调发展。正如生态学家所指出的“人类在地球上的生存将依赖于生态学的进步”，“现代

自然科学的主导趋势之一是它的生态学化”，“科学的未来是生态学的未来”。因此，人类生态学的研究注重多学科的交叉与综合。

2) 应用性。人类生态学是一门具有广泛应用性的学科，它与全球的资源利用、环境保护、区域经济发展、国土整治、区域生态、生态体制、生态政策、环境立法等联系密切，而目前应用最广的是生态恢复与建设。

3) 系统性。人类生态学以系统科学的研究方法为出发点，将人类生态系统视为一个多层次的复合系统，一方面从整体上对其进行综合研究，另一方面又从各个子系统、各个组成要素的关系方面对其进行深入研究，以揭人类生态系统中多因多果、连锁反馈的网络关系，寻求适合可持续发展的生态系统模型。

4) 可调控性与继承性。人类生态学科学地将生态学的“循环再生、协调共生、持续稳生”的生态调控原理运用于人类生态系统，使人类生态学具有了科学的思维方法，广泛地应用于人类生态系统的生态工程建设、生态体制建设和生态文化建设中。同时，人类生态学具有传承和继往开来的特征，经典生态学的研究方法，同样可应用于人类生态学的研究中。

5) 双重性。人类生态学把人作为生物的人和文化的人两条主线进行研究，而具有文化是人与动物的根本区别。因此，人类生态学强调政策的生态文化诱导，并把社区作为人类生态系统的基本单元，用生态文化建设文化社区，用生态文化发展生态文明，以实现人类社会的可持续发展，这是人类生态学的宗旨。

(二) 人类生态学的研究方法

除采用生态学的一般研究方法，比如定性分析、定量和模型化方法、计算机技术和野外调查等方法外，人类生态学还有其独特的研究方法，即将人口、资源、环境视为一个多层次的复杂系统，从整体上对其进行综合研究。

第二节　人类种群结构与动态

作为生物的人，人类同属于一个生物种——哺乳动物纲灵长目人科、人种。人类对自然环境的生物生态适应形成了人类不同的体质形态和不同的人种，人类种群具有自身独特的结构与动态。

一、人类种群概述

(一) 人类种群的形成

人类是一同源性生物种，它是自然环境演化的产物。自从人类在地球上出现以来，人类便开始逐步由诞生地向世界各地迁徙，经过五次大规模迁徙，人类现已广泛分布于世界各地。由于自然环境的多样性，在不同环境中生存的人群，长期生态适应的

结果，使其体质形态发生了较明显的变化，在全球范围内，形成了适应一定地域环境的人种或种族。

人种或种族(race)是根据能遗传的体质形态特征(比如肤色、发色、发型、眼色、眼形、胡须、体毛、身高等)划分出来的地域性人群。从人种的形成过程看，由于受特定地理环境的影响，人类在从古猿→猿人→智人→新人的漫长的演化过程中，在新人阶段，开始出现不同体质形态的原始人种分化。不同人种的形成过程与生物的不同生态型的形成过程类似，因此，人种也称为人的不同生态型。

(二) 人种的特征与分布

根据人类种群的体质形态和内部生理、生化特征，可将其划分为四大类型，即亚美黄色人种、欧洲白色人种、非洲黑色人种和大洋洲棕色人种。各类型人种的起源时间大致相同，形成过程也是基本相同和平行的。

1) 黄色人种。黄色人种肤色褐黄或浅黄，头发粗直而色黑，面部宽阔，颧骨高而突出，鼻根低矮而平直，唇厚中等，眼色暗黑或黑褐，眼睑有内眦褶，外眼角稍向上斜，胡须和体毛最为稀少。黄色人种主要分布在亚洲的大部分地区和美洲。

2) 白色人种。白色人种肤色白或浅褐，发色和眼色较浅。头发柔软，多呈波状，发色为金栗、棕黄、棕褐、灰黑等色，眼球虹彩呈青蓝色、碧色、蓝灰色，鼻子狭窄而鼻梁高直，嘴唇薄，口裂开度较小，胡须和体毛较发达。白色人种主要分布在欧洲、北美洲、西亚和印度北部等地。

3) 黑色人种。黑色人种肤色黝黑，头发黑色或暗褐色，多卷成螺旋状，鼻翼宽，鼻根低矮，唇厚而凸，口裂和眼裂开度较大，眼球彩虹颜色深，黑白分明，胡须和体毛较少。黑色人种主要分布在非洲大陆。

4) 棕色人种。棕色人种肤色从棕色到深棕色，头发黑色，波状或卷羊毛状，眼球彩虹多呈黑褐色或浅褐色，唇厚，鼻梁较低鼻根凹或低平，眉脊显著，胡须和体毛较发达。棕色人种主要分布在大洋洲及其岛屿附近。

在此基础上，还可根据人的生态适宜差异，将四大人种类型进一步细分为很多小种群类型。比如黄色人种可分为北亚人种、北极人种、远东人种、南亚人种、美洲人种和波里尼西亚人种等。这些不同的人种作为哺乳动物纲灵长目人科、人种的同一生物种， 由于地理环境、文化等隔绝，长期生态适应的结果，形成具有一定的外部体质形态和内部生理、生化特征差异的人群，并通过遗传将这些差异固定下来是生态型。

(三) 人种形成的生态学原因

作为生物的人，人类种群的生物生态适应遵从伯格曼、阿伦和格洛洛三大法则，即伯格曼法则：体重在气候温暖的地方较小，在气候寒冷的地方较大；阿伦法则：突出的肢体，在较冷的地方比较热的地方短；格洛洛法则：肤色在温暖潮湿的气候中较深，在寒冷干燥的气候中较浅。

从生态学上看，人类种群的分化，是同种个体在不同地理环境条件作用下，长期对特定的地理环境“趋异适应”的结果，形成“遗传漂变”，即自发遗传的过程。“遗传漂变”的实质在于，几乎所有实行内婚制的孤立种群，明显提高了隐性基因在等位基因中相遇的机会，不断降低与其他小群体杂合性婚配的可能性，从而提高了隐性基因在纯合状态下的集中程度。遗传漂变的结果，形成了人类种群的不同种内生态型——不同人种。也即形成了四大人种类型以及与之密切相关的很多小种群类型。

二、人类种群结构

(一) 人 口 性 比

性比(sex ratio)是指男性人数与女性人数的比例，通常以每 100 名女性人数所对应的男性人数来表示。计算公式为

$$\text{性比} = \frac{\text{男性人口}}{\text{女性人口}} \times 100\ \%$$

人口性比决定着人口的繁殖情况，在一定程度上影响着人口的出生率和死亡率。理论上人口性比为 1∶1，但统计资料显示，新生婴儿的性比，总是恒定在 105 左右，即每出生 100 个女婴就会生 105 个男婴。由于男性与女性的死亡和迁移状况不同，性比在不同年龄段有一定变化。据联合国估算，世界人口性比基本上是平衡的(100.9，1985年)，但发达国家与发展中国家有明显区别。欧洲、北美等发达国家，女性多于男性。发展中国家，尤其是亚洲的发展中国家，男性多于女性。中国人口的性比为 106.74(表19-1)。

表 19-1　1949~2000 年中国人口性比

年份	性比
1949	108.16
1950	108.07
1953	107.56
1960	107.39
1964	105.46
1970	105.90
1975	106.15
1980	105.98
1990	106.60
2000	106.74

引自国家统计局　2000

(二) 人口年龄结构

人口年龄结构(age structure)是指一定时间、一定地区各年龄组人口占总人口的比重。人口年龄结构与人口动态有着更为紧密和直观的关系。根据年龄结构可以编制生命

表，对人口的出生率、死亡率、期望寿命等做出估计。

1. 人口金字塔

人口年龄结构常用人口金字塔(population pyramid)来表示，即人口金字塔是以条形图的形式直观地表达人口年龄结构与性别结构的组合图形(图 19-1)。它以纵轴表示年龄组(通常每 5 岁为一个年龄组)，横轴表示人口数量或比重。横轴左边表示男性人口，右边表示女性人口，年龄组最小的放在底层，然后逐一将相邻各年龄组向上叠加，即构成人口金字塔。人口金字塔可以有多种形态，但常见的人口金字塔有三种图形(图 19-1)。其中，图形上尖下宽，呈金字塔形，表示人口中儿童青少年所占比例大，属增长型；图形上下差不多，呈宝塔形，表示各年龄组人数大致相等，属静止型；图形底部窄小，表示人口中儿童青少年所占比例小，属减少型。

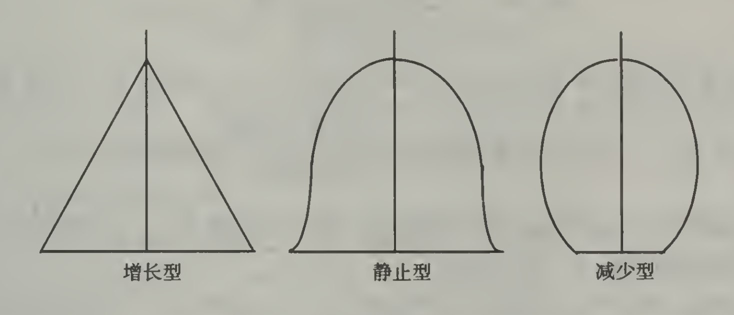


图 19-1　人口金字塔和三种人口结构比较

2. 同生群和同生群效应

1) 同生群(cohert)。是指同一年代出生的人群。同生群人口具有相同的社会时代背景，共同经历了相同的社会历史事件，可反映时代的变迁。因此，在人类生态学的研究中具有重要意义。

2) 同生群效应(cohert effect)。是指一个同生群的人口规模对这个同生群的影响。同生群规模将部分地决定着一个人的社会和经济福利状况。处于同生群规模较小的个人，比如在 20 世纪 30 年代出生的人，他们的一生在入学、就业和住房等问题上面临的竞争较小。而处于同生群规模较大的个人，比如在战后“婴儿热”时期出生的人，在入学、就业和住房等方面将面临更多的困难和竞争。这意味着同生群规模和福利之间是一种逆向相关，即当同生群人口数量增加时，他们的经济和社会成功概率就会减少，这种现象就是所谓的“同生群效应”。对同生群进行研究，可以更好地了解社会事件对人类生命历程的影响并进一步揭示社会生活的变动机制。

3. 人口年龄结构类型

国际上通常根据一个国家或地区的老年人口系数、少年儿童人口系数、老少比和年龄中位数的状况来判断一个社会的人口年龄结构。依据各种指标人口的年龄结构可分为年轻型人口、成年型人口、老年型人口三种类型(表 19-2)。

表 19-2　划分人口年龄结构的标准

年龄结构类型	老年人口系数	少年儿童人口系数	老少比	年龄中位数
年轻型	5%以下	40%以上	15%以下	20 岁以下
成年型	5%~10%	30%~40%	15%~30%	20~30 岁
老年型	10%以上	30%以下	30%以上	30 岁以上

其中，老少比，也称老龄化指数(index of aging)是指 65 岁以上老人数与 14 岁以下人数的比例，计算公式为：

老龄化指数(老少比)=(65 岁及以上人口数/0~14 岁人口数)×100%

老年系数是指 65 岁及以上人口在总人口中的比例，计算公式为

$$老年系数 = \frac{65岁及以上人口数}{总人口数} \times 100\%$$

少年儿童系数是指 14 岁及以下的少年儿童在总人口中的比例，计算公式为

$$少年儿童系数 = \frac{0 \sim 14岁人口数}{总人口数} \times 100\%$$

年龄中位数(age median)是指中位数以上和以下人数各占一半的年龄，它反映了总人口的年龄特征和状况。计算公式为

年龄中位数=年龄中位数组的下限年龄＋[(人口总数/2)－中位数组前各年龄组累计人数/中位数组所在组人口数]×中位数所在组的年龄组距

划分人口年龄结构具有重要的社会意义。首先，掌握一个国家或地区的人口年龄结构类型有利于确定社会问题的重点和理解社会变迁的内在动力。比如年轻型社会将面临各种学龄少年儿童的教育问题，青年人的就业和婚姻问题，以及与此相关的住房等问题。成年型社会将面临如何积累社会财富等问题。老年型社会将面临各种养老问题，医疗保健服务问题以及社会劳动力供应等问题。其次，掌握一个国家或地区的人口年龄结构类型有利于制定人口政策，引导未来人口再生产的规模和速度。

4. 人口老龄化

人口老龄化(population aging)是指某一人口总体中老年人口(65 岁及以上)的比重逐渐增加的过程，特别是指在年龄结构类型已属年老型的人口中，老年人口比重继续上升的过程。人口老龄化是由于死亡率下降，老年人口增多，或出生率下降，儿童青少年人口减少，两者共同影响的结果。

20 世纪 60 年代以来，世界人口出生率急剧下降，老年人口在总人口中的比例上升的很快。一些发达国家相继进入老龄化国家。70~80 年代以来，许多发展中国家开始实施控制人口的政策，出生率开始下降，到 21 世纪，一些发展中国家也开始出现人口老龄化的趋势。预计 2020 年全世界除非洲撒哈拉以南十几个国家之外，其他众多国家都将步入老龄化国家之列。

人口老龄化给全球带来了巨大负担和压力，引发了一系列社会问题，比如造成劳动

力资源的短缺、老年人赡养系数增加等，对社会经济发展极为不利。因此，必须采取积极的态度应对老龄化的挑战。比如适当调整人口政策，预防人口过度老化，加大社会保障制度建设等，减轻人口老龄化对社会经济发展的影响。

（三）人口出生率、死亡率和自然增长率

1. 人口出生率、死亡率和自然增长率的概念

人口出生率、死亡率和自然增长率是研究人类种群统计中的基本参数。出生率和死亡率决定着自然增长率，而自然增长率大小直接制约着人口的增长状况。

1) 出生率(birth rate)。又称粗出生率，是指一定时期内(通常为 1 年)平均每千人所出生的人数的比率，一般用千分率表示。计算公式为：

$$出生率=\frac{年出生人数}{年平均人数}\times 1000\ ‰$$

式中：出生人数指活产婴儿，即胎儿脱离母体时(不管怀孕月数)有过呼吸或其他生命现象。出生率作为最常使用的指标，一般以 30‰的出生率为分界线，出生率高于 30‰为高出生率，低于 30‰为低出生率。

2) 死亡率(death rate)。又称粗死亡率，是指在一定时期内(通常为 1 年)一定地区的死亡人数与同期平均人数(或期中人数)之比，用千分率表示。计算公式为

$$死亡率=\frac{年死亡人数}{年平均人数}\times 1000\ ‰$$

通常，死亡率在 6‰~35‰之间变化。一般以 20‰为分界线，高于 20‰为高死亡率， 低于 20‰为低死亡率或向低死亡率转变的转折点。

3) 自然增长率(rate of natural increase)。是指一定时期内(通常为 1 年)人口自然增加数(出生人数减死亡人数)与该时期内平均人数(或期中人数)之比，用千分率表示。计算公式为：

$$自然增长率=\frac{本年出生人数-本年死亡人数}{年平均人数}\times 1000\ ‰$$

或

$$自然增长率=人口出生率-人口死亡率$$

2. 人口转变规律

综观人类历史，世界人口的自然增长经历了从高出生率、高死亡率、低自然增长率到高出生率、低死亡率、高自然增长率再到低出生率、低死亡率、低自然增长率三个阶段(图 19-2)，人口生态学家称人口增长的这种规律为人口过渡理论(population transition theory)。比如芬兰人口变化就是这一理论的典型实例(表 19-3)。

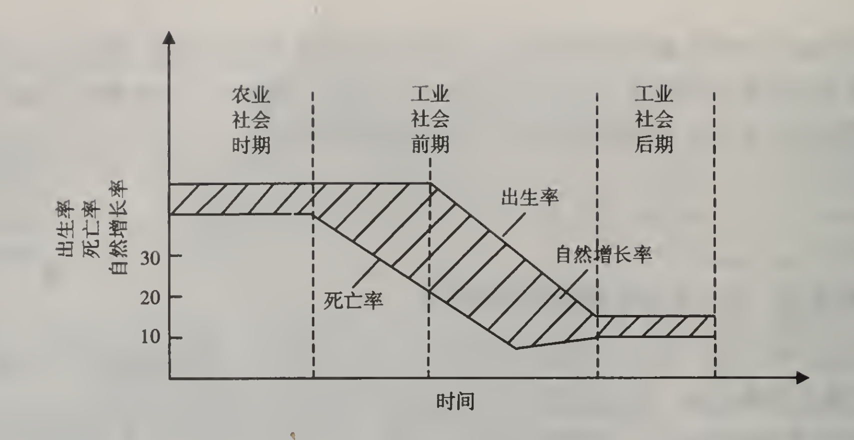


图 19-2 人口转变曲示意图

1) 第一阶段。高出生率、高死亡率、低自然增长率，该阶段为人口增长的低级类型。该类型主要出现在采集狩猎社会到农业社会阶段，现多见于发展中国家。比如几内亚， 出生率为 54.0‰，死亡率为 42.5‰，自然增长率为 11.5‰。

2) 第二阶段。高出生率、低死亡率、高自然增长率，该阶段为人口增长的过渡类型。该类型主要出现在工业社会前期到中期阶段，现多见于正处于加速工业化和城市化的发展中国家。比如墨西哥出生率为 33.6‰，死亡率为 6.0‰，自然增长率则高达 27.6 ‰(1983)。

3) 第三阶段。低出生率、低死亡率、低自然增长率，该类型为人口增长的稳定类型。该类型主要出现在工业社会后期，现多见于欧美等发达国家。比如英国出生率为 12.8‰，死亡率为 11.7‰，自然增长率仅为 1.1‰(1983)。

人口过渡理论反映了人口再生产类型与社会经济发展趋势相关联，随着科技进步和经济发展，社会医疗保障水平提高，人口死亡率下降，人口增长类型必将过渡到稳定类型。

表 19-3 芬兰 1785~1976 年人口增长的三个阶段

时期	出生率 /‰	死亡率 /‰	自然增长率 /‰	阶段
1785~1790	38	32	6	1
1825~1830	38	24	14	2
1910~1915	38	17	21	2
1970~1976	13	10	3	3

(四) 人 口 质 量

1. 人口质量的概念

人口质量(population quality)是指人类具有的认识和改造世界的条件和能力。它是人类种群的重要特征之一，同时也是影响人类种群发展演化的重要因素。

2. 人口质量的测量指标

(1) 人口质量的直接指标

1) 平均期望寿命和长寿水平。平均期望寿命指新生婴儿按该时期的死亡水平预期能活到的岁数。它反映人口总死亡率和婴儿死亡率的状况，反映国家地区经济发展水平和医疗卫生状况。比如解放前，中国人口的平均期望寿命为30~35岁。解放后人口死亡率迅速下降，1990 年男女平均期望寿命为 67.7 和 70.9。这比发展中国家的平均水平高 10 岁，比世界平均水平高 5 岁。长寿水平是指 80 岁以上的人口数占 60 岁及以上人口数的比重。发达国家长寿水平一般在 10%以上。

2) 残疾人口所占比重。指肢体、智力、听力、语言、视力、精神残疾人口占总人口的比重，不包括内脏残疾人口。

3) 青少年身体发育指标。指青少年人口每 10 年平均身高、体重增加的速度。它反映了人口的发育情况与营养水平。

4) 教育水平。常用两类指标，一是反映教育流量的指标，包括各级各类学校招生数、在校学生数、毕业生数、每万人口在校学生数以及与此相关的相对指标，比如每万人口中大中小学生构成、入学率等。二是反映教育存量的指标，包括每万人口中大学文化程度的人口数、15 岁以上人口中的文盲人口数、各年龄组人口的平均受教育水平以及与此相关的指标。

5) 死因指标。通过死亡原因分析说明人口总体健康水平。

(2) 人口质量的间接指标

人口质量的间接指标，也称物质指标，是指那些与人口质量的高低呈正相关的指标，它反映一国或地区为提高人口质量所提供的社会条件。

1) 医疗卫生和保健的普及程度　指每万人中医生数、床位数、人均卫生经费、卫生经费占国民收入的比重等。

2) 人口食物构成和营养状况指标　指每人每天的热量、蛋白质供应量或每年人均消耗指数，比如年人均食用肉类、奶类、豆类指标，人均占有粮食数量和卫生用水状况。

3) 人均住房面积

4) 体育运动事业的普及程度

5) 环境监测状况及污染指数

6) 教育经费在国民收入中所占比重，学生教师比，科研机构的门类、数量和水平，这些指标反映了教育的发展程度。

7) 图书、报刊发行量

8) 广播、电视覆盖率

(3) 人口质量的国际常用指标

1) 生命质量指数(physical quality of life index，PQLI)。也称人口质量指数，是从健康和文化教育两方面反映人口质量的综合指标。PQLI 由美国海外发展委员会提出(1975)，它由婴儿死亡指数、1 岁时平均期望寿命和成人识字率三项指标构成，该三个

指标的算术平均数，即为生命质量指数。计算公式为

$$\text{PQLI} = \frac{\text{婴儿死亡指数} + 1\text{岁时平均期望寿命} + \text{成人识字率}}{3}$$

PQLI 值从 0~100，数值越高代表一国或一个地区的人口质量越高。婴儿死亡指数是衡量一国或一个地区医疗卫生水平和妇幼保健状况的一个敏感指标。以婴儿死亡率最高的国家(加蓬，229‰)作为计算尺度的起点，即零点，以婴儿死亡率最低的国家(瑞士，7 ‰)作为计算尺度的上限 100，则婴儿死亡率每改变 2.22‰，婴儿死亡指数就改变 1。1 岁时平均期望寿命，以平均期望寿命最低国家(几内亚，38 岁)为零，以平均期望寿命最高国家(日本，77 岁)为 100，则平均期望寿命每改变 0.39 岁，1 岁时平均期望寿命就改变 1。成人识字率指数不用换算，直接使用 15 岁及以上人口中识字人口占 15 岁及以上人口总数的比重即可。根据 PQLI 的计算，世界人口素质可分为三种类型，低于世界平均值 65 的属于低素质人口类型，介于 65~80 属于中等水平类型，80 以上属于上等水平类型。瑞典、挪威、荷兰、日本等国家的 PQLI 值都在 95 以上，北美、西欧等国家接近 95，最低的是非洲，平均为 32 左右。中国为 84.5(1990 年)，属于中上等水平类型。

2) 美国社会健康学会指标(American Social Health Association，ASHA)。该指标由 6 项组成，计算公式为

$$\text{ASHA} = \frac{\text{人均GDP增长率 就业率} + \text{文化普及率} + \text{平均寿命指数}}{\text{出生率} + \text{婴儿死亡率}}$$

比较理想的人口质量是人均 GDP 增长率为 3.5%，就业率为 850‰，文化普及率为 840 ‰，平均寿命指数为 100，出生率 25‰，婴儿死亡率 50‰，由此可计算出理想的 ASHA 为 2023。ASHA 可较好地衡量社会发展的综合状况，但由于出生率受多种因素的影响，因此 ASHA 不具有国家间的可比性。

3) 人类发展指数(human development index，简称 HDI)。该指标由联合国开发计划署(UNDP)提出，用于测量发展中国家摆脱贫困状况的程度。HDI 指数现已成为衡量世界各国或地区人类社会发展程度的统一尺度，它由平均期望寿命、文化指标(成人识字率× 2/3+ 平均受教育年限×1/3)和按购买力计算的人均 GDP 三项指标组成，该三个指标的算术平均数，即为生命质量指数。计算公式为

$$\text{HDI} = \frac{\text{平均期望寿命} + \text{文化指标} + \text{按购买力计算的人均GDP}}{3}$$

经计算，1991 年世界 160 个国家和地区中，HDI 值在 0.8~1 之间的国家有日本、加拿大等 53 个国家，在 0.5~0.799 之间的国家有巴拿马、中国等 44 个国家，在 0.0001~0.499 之间的国家有 63 个。

(4) 遗传和优生

1) 遗传。遗传是生物个体代际间的延续，遗传物质(基因)从亲代传给子代，使亲代的性状又在子代表现出来的一种自然现象。遗传基因对人的体质和大脑机能有十分重要的影响。各种遗传性疾病就是严重有害基因遗传的结果，比如先天愚性是由于亲代精卵结合时染色体数目的改变而导致的。据联合国辐射委员会的报告，人类的遗传病负荷已达 10.8%，即每 100 人中就有 10.8 人有遗传缺陷。目前，生命科学的发展使人类在遗传基因研究方面取得了突破性进展，比如人工受精、基因修复、克隆技术等，对改善人口质量将起到巨大的推动作用。

2) 优生。优生是用消除不利表型的等位基因频率和增加有利表型的等位基因频率的办法改善人类群体的遗传素质，提高人类群体的身体素质。有关优生的科学称为优生学，它是运用遗传学的原理和方法，改善人的遗传素质的一门综合性科学，重点是研究提高人口出生素质，防止出生缺陷的科学。目前，常采用的优生优育计划有禁止近亲结婚、实行婚前检查、开展遗传咨询、提倡适龄生育、加强孕期保健、加强产前诊断、科学养育等方法，对提高人口素质起到了明显的作用。

三、人类种群动态

(一) 人口的数量动态

1. 世界人口的数量动态

目前，地球上已经居住着 60 多亿人口，如此规模庞大的人口是怎样形成的呢？从人类历史看，世界人口有过三次较大的增长(即三次人口高潮)。第一次是人类祖先刚从灵长类进化为人的时代。由于人类直立行走、使用和制造工具、语言和思维的产生等特征，人类从单独或小群栖息的灵长类进化为开阔的平原地带过群居生活的原始人类。岩石洞穴或其他永久性的隐蔽所，使人类受洪水猛兽侵害的机会大大减少，对不良气候条件的适应能力提高，火的使用标志着人类开始熟食，减少了疾病，提高了抵御野兽和生存能力，死亡率降低，出现了人类数量增长的第一次高峰。第二次是在由渔猎社会过渡到农业社会的时代。大约出现在公元前 8000 年时，人类开始定居生活。作物的种植和家畜的饲养，使人类可能储存粮食，得到较稳定的食物保障，出生率增加，死亡率下降，形成人口增长的第二次高峰。第三次是 17 世纪中叶文艺复兴以后，一直持续到现在。由于科技发展和医疗水平提高，人口死亡率显著下降，人均寿命增长，使人口增长仍在继续。据资料分析，公元前 5000 年时，世界人口仅 500 万，当 1492 年哥伦布发现新大陆时，世界人口也不过 2.5 亿，而 500 年后的今天，世界人口已突破了 60 亿。估计到 2025 年世界人口将达 82 亿，2050 年达 94 亿，2100 年达 104 亿(表 19-4)。其中，世界人口每增加 10 亿所需要的时间越来越短。从 10 亿增至 20 亿，大约经过了约 123 年；从 20 亿增至 30 亿，经过了约 33 年；从 30 亿增至 40 亿，经过了约 14 年；从 40 亿增至 50 亿，经过了约 13 年；从 50 亿增至 60 亿，只用了 12 年的时间。

表 19-4 全球人口的增长状况(公元前 100 万年~公元 1999 年)

年　份	人口数量
公元前 100 年	12.5 万
公元前 30 万年	100 万
公元前 1 万年	400 万
公元前 5000 年	500 万
公元前 1000 年	5000 万
公元前 500 年	1 亿
公元前 200 年	1.5 亿
公元元年	1.7 亿
公元 500 年	2.0 亿
公元 1000 年	2.65 亿
公元 1500 年	4.25 亿
公元 1800 年	9.0 亿(联合国基金会认为 1804 年为 10 亿)
公元 1850 年	12.0 亿
公元 1900 年	16.25 亿
公元 1950 年	25.16 亿
公元 1960 年	30.19 亿
公元 1970 年	36.93 亿
公元 1980 年	44.50 亿
公元 1990 年	53.33 亿
公元 1999 年	60.00 亿(联合国数字)

引自中国科学院可持续发展研究组　2000

由此可见，世界人口的增长速度是非常迅速的，呈指数增长模式，基本符合逻辑斯谛增长规律。越往后，人口总量的急剧膨胀越加明显，人类的生存与发展面临的压力也越来越大。但由于风俗习惯、伦理观念和各种社会因素等的影响，世界人口的发展极不平衡，各大洲人口增长速度很不一样，形成了两种不同的趋势：发达国家或地区人口增长缓慢，发展中国家或地区人口增长很快。比如按 1976 年的增长率计算，使人口翻番所需要的时间，欧洲为 116 年、北美洲为 87 年、亚洲为 35 年、非洲为 27 年、拉丁美洲为 25 年。目前，世界人口自然增长率为 15‰，发达地区为 2‰，发展中地区为 10‰。欧洲是人口增长最缓慢的地区，人口自然增长率为 1‰，而非洲人口增长最快，人口增长率达 28‰。

2. 中国人口数量动态

中国人口一直占世界人口数量的巨大份额，据史料记载，早在公元前 2200 年的夏禹时，中国人口已达 1000 多万(占当时全球人口 2700 万人的 37%)。公元前 400 年，中国人口占世界总人口的 30%。公元初至 17 世纪中期的 1700 多年间，由于多年战乱和灾荒，人口增长极为缓慢，长期波动在 5000 万~6000 万人。随后，人口迅速增加。1644 年(清朝初年)，人口达 8849 万。1711 年人口突破 1 亿，占当时世界人口的 26.4%。1762 年人口数量达到 2 亿，占当时世界人口的 26.6%。1830 年达到 4 亿，占当时世界人口的 25.2%， 即地球上每 4 个人中就有一个中国人。1949 年达到 5.4 亿，占同期世界人口的 24.12%。近 30 年来，由于中国政府成功地实施了人口控制政策，到 1999 年，当世界人口突破 60 亿大关时，中国人口占世界人口总量的比例已下降到 20.83%。综观

中国人口增长过程，可以发现中国人口数量变动与世界人口增长基本一致，从 17 世纪以后，中国人口增长也呈指数增长模式，基本符合逻辑斯谛增长规律(图 19-3)。

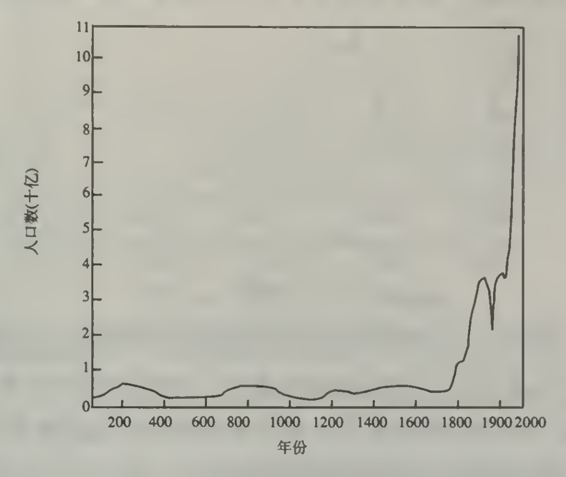


图 19-3　公元 200~2000 年中国人口数量变化情况(引自肖自力等　1998)

对比世界人口与中国人口增长曲线，可以发现二者极其相似。在一个相当长的时期内，二者均属于指数方程的非线性增长。这表明，人口的数量增长与自然界生物种群的数量增长具有共同的本质特征，即不受外部环境干扰的情况下指数形式扩张。并且，与自然界生物种群的增长一样，当受外部环境的“积累式”压力时，不可避免地实施主动的或被动的压缩，由指数增长形式转换为逻辑斯谛增长形式，最终达到一个稳定的零增长区间。总之，人类种群的增长，也符合逻辑斯谛增长。即

$$\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t} = rN(\frac{K-N}{N})$$

式中：r 为内禀增长率；N 为起始种群数量；K 为环境的最大负荷量；$(\frac{K-N}{N})$ 为环境阻力。

由于世界人口基数过大以及不可抗拒的自然规律，控制人口过快增长的任务依然十分艰巨。人口问题已成为全球政治经济发展格局中的一个重要组成部分，它对人类社会的发展有着越来越重要的意义。对世界各国社会经济发展有着越来越大的影响。因此，国际社会将人口控制作为可持续发展的一个战略目标，同时也将全球性的人口问题写进了 21 世纪议程中。

3. 未来人口预测

20 世纪 60 年代以来，随着人口问题的日益严重，人口学家、联合国人口活动基金会及许多国际机构先后对未来人口趋势作了种种预测，并提出了未来人口发展的三种可能模式。

1) 人口崩溃曲线模式。该模式认为，人口自然增长将超过地球承载能力，最终将由于资源耗竭和环境恶化而导致人口崩溃(图 19-4)。

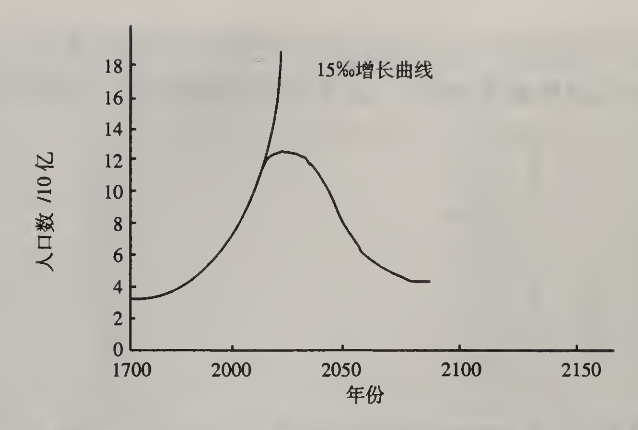


图 19-4　增长率为 15‰的持续增长曲线和伴随这种增长的人口崩溃曲线

2) 人口自然增长率逐渐接近于零增长的模式。该模式假设在下列情况下才能达到这种曲线：① 没有超出地球能继续维持人类合理健康和文化的水平。② 人口自然增长率下降，人口总数限制在地球生态系统能维持的限度之内。③ 当达到人口稳定时，资源和人类才智足以创造一种人口的出生和死亡相等的局面。该模式中较低的曲线 *A*(图 19-5)表示 70 亿人口水平。它所根据的假设是到公元 1985 年世界范围内增长率为零。即使出现这种情况，也还应考虑到"增长的惯性"。这种因素的力量是巨大的，即使是在最有利的条件下，在 70 年内也不会出现人口的平衡，何况直到 1995 年世界人口自然增长率仍有 15‰，并未达到零增长。因此，世界人口水平决不会低于 70 亿。该模式中较高的曲线 *B* 是一种并不乐观的现实主义，这条曲线表示人口水平要达到 140 亿以后才能达到稳定状态。

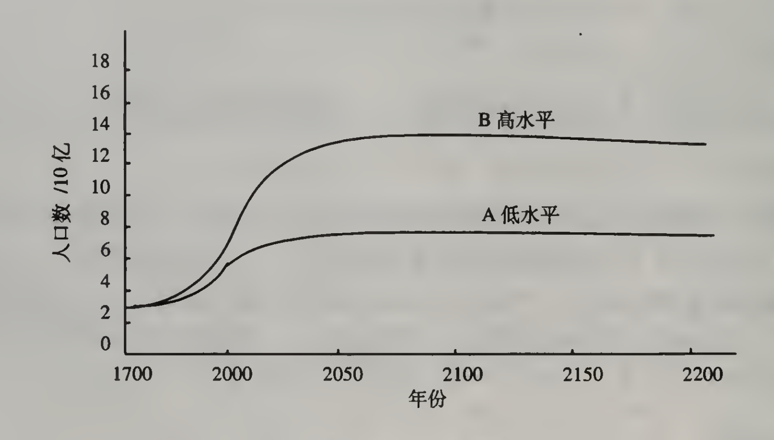


图 19-5　人口自然增长率达到零增长时的曲线

3) 爱尔兰人口下降曲线。该模式是指因天灾导致的人口暂时下降和舆论一致同意保持的人口水平(图 19-6)。它的名称来源于 18 世纪 40 年代爱尔兰遭受一场马铃薯灾荒。经过 10 年饥荒之后，由于死亡和移民，人口下降 240‰。随后，爱尔兰人不允许再发生人口过剩。他们改造自己的家庭结构，使之向小而少的方向发展。生产多样化，避免依赖单一作物，改变他们在饥荒以前单纯以马铃薯为主食的习惯。

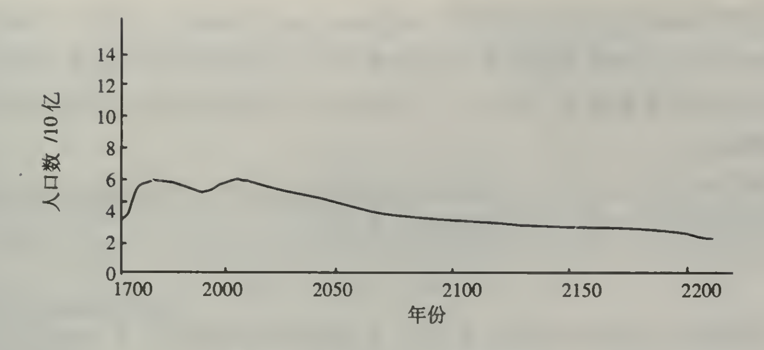


图 19-6　爱尔兰人口下降曲线

在以上三种可能的模式中，零增长模式得到了大多数人的支持，并成为当今世界解决人口问题的目标模式。据联合国和世界银行的预测，2025 年世界人口将达 82 亿，2050 年达 94 亿，2100 年达 104 亿。

世界人口能否实现零增长？这是每个地球人都关心的问题。联合国远期预测指出，世界人口零增长的时间为 100 多年后的 2110 年，那时人口可能徘徊在 105.8 亿左右。欧美发达国家在 2062 年以前进入人口静止状态，亚非拉等发展中国家最快也要在 21 世纪末才会实现人口零增长。

中国作为世界上第一人口大国，人口增长的趋势，无论对中国、对世界的发展都有举足轻重的影响。预计到 2030 年，中国将实现人口数量的零增长，即实现人口自然增长率的零增长，届时人口总规模达到最高峰 16 亿，中国人口占世界的比例将从 1999 年的 20.83%下降到 18.82%。

(二) 人口的空间动态

人口的空间动态(spatial dynamics)是指人口在空间的分布和利用方式。它随着自然条件、社会条件以及人口的需要等因素的变化而变化。

1. 人类生态位

人类生态位(human niche)是指人类对环境的需求及环境对人类的作用程度和方式。对于人类种群来说，生态位是一个很复杂的问题。因为人类已经成为生物圈中的绝对优势种。一方面，人类作为一个物种，在地球生物圈中，只是生命大家庭的一员，是食物网中的一个网点。另一方面，人类又不同于其他生物，在整个生物圈中又是调控者。人类对地球既是建设者，又是破坏者。人类的环境，包括人类居住地的物理因子(温度、湿度、气压等)、化学因子(大气成分、水质等)、生物因子和社会因子(人际关系、政治、经济、文化等)。物理、化学和生物因子对人的影响表现出人与生物的共性，而社会因子对人的影响表现出人区别于其他生物的特殊性。

虽然人类和其他生命形式一样，其生命活动的基础是生物化学过程，需要物质和能量的输入(即食物的摄取)，需要适宜的物理化学环境保证，而与动物最为重要的区别是“信息”的输入，是人类对文化娱乐等美的追求和享受，这些需要称为人类的“信息生

态位”。与生物种相似的是人类生态位的基本成分也包括栖息生态位、食物生态位 、种间关系生态位，但人类有其特殊的生态位成分——信息生态位。随着人类社会的发展，人类对信息的需求越来越大，因而，人类的信息生态位必将随人类的进化而扩展，它是人类文明的标志。

王刚等(1988)提出了人类生态位的概念与数学表达式。他们认为，一个种(无论是生物种还是人类)生态位可用一个 n 元函数 y 来表达：

$$y=f_i(x_1, x_2, \ldots, x_n)$$

式中：y 为物种或人类的生态位；f 为与 y 相应的环境状况；i 为种的序号，$i = 1, 2, \cdots, n$；x_n 为生态因子；n 为生态因子序号。

再定义 F_i 为种 i 的“生态位”，它表示种 i 对 n 个生态因子的适应和利用范围。

$$F_i=\{X / f_i(x_1,x_2,\ldots,x_n)\rangle 0, X=(x_1,x_2,\ldots,x_n)\}$$

对于某一空间范围的生境，定义 E 为该生境的“生态因子域”。

$$E=I_1 \cdot I_2 \cdot \ldots \cdot I_j \cdot \ldots \cdot I_n$$

式中：I_j 为第 i 个生态因子在该生境中的阈值，$I_j=[a_j, b_j]$。

若 $E \cap F \neq \varphi$，则种 i 能在此生境中生存，否则不能生存。

类似地，可求得人类生态位。人类所居住的某一具体生境(村落、城市等)，亦有其生态因子域。若人类生态位与其居住地生态因子域重叠，则表明人类可在该地生存。但这只区分了人类对于其所居住地适应程度的两种情况，即“适应”和“不适应”。若要进一步定量地测定居住地生境的适应程度，还必须定义一个“生态位适宜度”的测度。对于人类生态位，可用函数表达为

$$y=f_{\mathrm{H}}(x_1, x_2, \cdots, x_n)$$

式中：$x_1, x_2, \cdots, x_n$ 为“资源”(生态因子)，即人类对环境条件(包括物理条件、化学条件、生物环境等)、对食物、文化娱乐及其他信息的广义需求。

若对某一种资源数量化，并表示在数轴上，则此 n 种资源便构成了一个 n 维空间。 人类的某一居住地可表示为该空间中的一个点或很小的区域。这一点或小区域，称为该地的“资源位”(resource state)。若在 n 维资源空间上存在一点 $X_{\mathrm{A}} = [x_1a, x_2a, \cdots, x_na]$，使得

$$f_{\mathrm{H}}(x_1a, x_2a, \cdots, x_na)=\max f_{\mathrm{H}}(x_1a, x_2a, \cdots, x_na)$$

则称 X_{A} 为人类的“最适资源位”。

对于人类居住地广义的生境状况(即包括环境因子、生物因子、社会因子)，可用 n 维空间中的生态因子域 $E = I_1 \cdot I_2 \cdot \ldots \cdot I_j \cdot \ldots \cdot I_n$ 来表示。若取平均值，则该居住地生境可用一个资源位 $X_{\mathrm{k}}=[x_{1\mathrm{k}}, x_{2\mathrm{k}}, \ldots, x_{n\mathrm{k}}]$来表示。

定义表征人类最适生态位的 X_{A} 与表征某一居住地生境资源位的 X_{k} 之间的贴近程度 F_{A} 为“基础生态位适宜度”，即

$$F_{\mathrm{A}}=\varphi(X_{\mathrm{A}}, X_{\mathrm{K}})$$

若存在这样一点 $X_L = [x_{1L}, x_{2L}, \cdots, x_{nL}]$，使得当居住地的各维生态因子数值达到此点时，便有碍于人体正常的生命活动和正常的社会活动，则 F_B 可称为“保险生态位适宜度”，即

$$F_B=\varphi(X_L, X_K)$$

该生态位适宜度实际上是一种相似性测度(或称距离测度)，此类测度的计算公式种类繁多，在具体运用时，可根据生态因子的特征与研究目的而采用相应的公式。

2. 人际关系与小群体效应

(1) 人际关系

人是群居动物，由于人的群体生活是由人的自然属性和社会属性所决定的基本特征，这也就出现了人际关系问题。在人类生活中有两大关系，一是人与自然的关系；二是人与人的关系。每个人都毫无例外地需要与别人打交道，谋求沟通、和谐、配合、协作，结成一定的关系，组成社会。

人本身就是人际关系——父母交往的产物。一旦呱呱坠地，这幼小的生命就落入人际关系的网络中。通过物质资料的生产活动，将人类组成一定的群体。群体中人与人之间的互相理解、关怀、友爱、帮助，造就出一种良好的社会氛围，使整个群体保持一种稳定、融洽的秩序。反之，群体中人与人之间的互相冲突、冷漠、压抑、孤寂、苦闷，会造成人的心理病态，压抑人的积极性和创造性，使群体的秩序难以保持，导致群体中人才、能量的内耗，引发社会的不稳定因素。人的社会属性，决定了人与人之间的多层次、多方位、多途径、多类型的交流、联系与协作。因此，合理的人际关系，是人类生存与发展的重要前提。

(2) 小群体效应

人类的基本群体包括两类，一类是与个人关系非常密切的基本群体，比如家庭、邻里、朋友、同事等；另一类是较基本群体更大的单位、团体，一直到国家一级的大团体。其中，基本群体具有规模小、目标一致、聚合力强、相互间关系密切、信息传递快等特征。

社会学家和心理学家很早就重视对小群体的研究。他们发现，人的积极性主要受基本群体内人际关系的影响。一个人在小群体内与其他成员的关系融洽，能够互相关心、爱护和帮助，热爱自己的群体，则其劳动、工作热情就高，反之则低。而群体内人际关系的好坏，关键在于领导能否秉公办事，这是影响全局的关键所在。

人类基本群体具有一定的结构与功能，结构包括起领导作用的核心人物和一般成员，彼此间形成一定的网络结构，结成一定的相互关系，群体类型不同，结构也不同。基本群体的功能则在于以下四个方面：

1) 社会化的功能。基本群体是个人获得社会性的摇篮，是个人通向社会的桥梁。每一个人，出生后的第一个基本群体是家庭，在家庭和社会的熏陶下，逐步养成了自己的个性。以后再加入到社会的各个基本群体中，使自己充当社会大舞台上的一个角色。实际上，一个人若不在基本群体里生活和工作，是无法获得社会性的，也即无法形成完

整的人格。

2) 完成群体目标规定任务的功能。这是各类群体最基本的功能，无论对群体或社会来说，都是十分重要的。要实现这些任务，每个群体中都要解决协同问题。

3) 全面满足人的各项社会需求的功能。包括工作权利，安全保障，个人的尊严与荣誉，情感交流和精神寄托等。

4) 保持和传递社会文化，维持社会秩序的功能。这方面，与维持社会秩序和道德、法律建设有着更直接的关系。

3. 趋适宜效应与人口迁移

(1) 趋适宜效应

从生态学角度看，每一个生物种都有各自的生态位适宜度。人类作为一个由许多不同的小群体组成的种群，分布在地表不同的区域。人类种群，包括小群体，以及各个小群体中的个体、家族均有各自的生态位适宜度。这些个体、家族、小群体或种群，时刻都在有意识地寻求其生态位适宜度，并且在一定范围内，总是从生态位适宜度低的地区向生态位适宜度高的地区迁移，这种现象称为趋适宜效应。民谚“人往高处走，水往低处流”正是这一现象的生动写照。

(2) 人口迁移

人口迁移(migration)是指人口居住地(空间位置)永久性的改变，包括国际人口迁移和国内人口迁移。人口迁移必然联系两个地点，即迁出地与迁入地。人口移动的方向和强度取决于迁出地与迁入地之间的适宜度的差值，这种差值是一种“势”，驱动着两地之间的人口流动，即由生态位适宜度低的地区向生态位适宜度高的地区流动。

从人类迁徙的历史看，有史以来，人口曾经过五次大的迁徙。人类的发源地是亚洲南部和非洲东部的热带、亚热带地区，随后人类开始随水草和森林迁徙流动。大约在 4 万年前，人类已经扩散到亚洲、非洲、欧洲大陆上那些宜于人类生存的土地肥沃、水源丰富的地方。这就是人类种群的第一次大迁徙。第二次大迁徙，是人类种群的人口流动已经脱离了亚洲、非洲、欧洲三大洲的疆域，出现了对美洲和大洋洲的大规模迁徙，这发生在距今 3.5 万年前。那时，亚洲蒙古人种的一支从亚洲北部地区，穿过白令海峡迁徙到北美洲的阿拉斯加地区，随后又向南流动，大约在新石器时代初期，达到了南美洲的最南端。另一支亚洲人则向南流动，从马来半岛迁徙到印度尼西亚的爪哇岛，而后又移向大洋洲。在欧洲，大约从公元前 10 世纪，爱琴海各岛屿上的希腊人开始迁徙到意大利。公元前 4 世纪，古罗马人大举迁徙到多瑙河下游地区。人类种群的第三次大迁徙发生在 15 世纪末，哥伦布发现新大陆掀起了一轮向新大陆移民的浪潮。17 世纪涌向美洲大陆的欧洲移民越来越多，到 19 世纪，被贩卖到美洲、大洋洲的黑奴高达 2000 万人左右。人类种群的第四次大迁徙发生在 18 世纪中叶到 20 世纪初，欧洲向美洲大陆大量移民，这次大约至少向美洲大陆迁移了 5000~6000 万人口。人类种群的第五次大迁移，发生在第二次世界大战结束后直到 20 世纪 60 年代，由于战争难民、新兴产业形成、新兴城市出现、劳务输出等原因，造成人口的大迁徙。

从当代人口迁移的趋势看，一般是以个人和家庭为单位的迁徙，其基本流向是从农

村向城市迁移，从发展中国家向发达国家迁移。这是因为城市、发达国家的生态位适宜度较农村、发展中国家高，正是这种适宜度差异所形成的“势”，才驱动了移民潮或城市化过程。因此，只有加速区域经济的发展，逐步缩小地区差距，才能从根本上解决移民潮或城市化带来的种种弊端。

人类迁徙的结果，一方面促进了人类种群遗传基因的融合，使由于地理及社会隔绝而无法交流的单个种群得以相互渗透融合。另一方面也促进了各民族文化的交流与结合，促进了人类种群的进步与文化的发展。在某种意义上说，人类的发展史，就是一部人类种群和文化的优化组合史。比如美国有“民族大熔炉”之誉，各民族文化的交流与融合，造就了当代美国人的开拓和创新精神，这与非洲、次大陆等地的某些土著居民相比，具有显著的优势。

4. 人口分布

(1) 人口分布的概念与测量指标

人口分布是指一定时间内人口在地理空间上的结构。其测量指标主要有人口密度、人口集中系数和城市化指标。

1) 人口密度(population density)。人口密度是指某一时间单位土地面积上所居住的人口数量，通常以每平方公里常住的人口数量来表示。计算公式为

$$人口密度 = \frac{人口总数}{总面积} \quad (单位：人/km^2)$$

人口密度反映了人口在地域分布上的稠密程度，它的大小，不仅直接影响人类种群的兴衰，而且也对生物圈产生深刻的影响。人口密度高的地区称人口稠密地区，人口密度低的地区称人口稀疏地区。

2) 人口集中系数。该指标反映人口相对于土地的分布均匀程度。计算公式为

人口集中系数=0.5∑｜各地区人口在总人口中的比例－该地区土地面积在总面积中的比例｜

人口集中系数越小，则人口相对于土地分布越均匀，反之则说明局部区域人口的集中程度较高。

3) 城市化指标。城市化水平是指一个国家或地区的城市人口占总人口的比例。计算公式为

$$城市化水平 = \frac{某地区城市人口数}{该地区总人口数}$$

(2) 世界人口分布特征

1) 人口分布格局不断变化　世界人口分布是一个动态的历史过程，其人口密度不断增大。自人类产生的 100 多万年来，人口分布格局不断变化。总体的变化轨迹是人类定居范围不断扩大，人口密度不断增大，工业革命后人口密度增加明显(表 19-5)。

表 19-5 全球人口密度变化估计

年代	文化阶段	人口密度 /(人/km^2)
百万年前	旧石器时代早期	0.004
30 万年前	旧石器时代中期	0.002
2.5 万年前	旧石器时代晚期	0.004
1 万年前	中石器时代	0.004
2~9 千年前	新石器及农耕时代	0.01~1.0
210~310 年前	农耕及工业时代	3.7~4.9
10~60 年前	农耕及工业时代	11~16
现代	农耕及工业时代	＜46

引自李亦园 1984

2) 人口地区分布不均衡，人口稠密地区和稀疏地区并存。由于自然环境、历史和经济发展不均衡等原因，世界人口分布极不均衡。地球中纬度地带是人口最稠密的地区， 而高纬度地带人口稀少，低纬度地带人口分布差异也很大，比如炎热的热带沙漠地区大都无人居住。目前世界人口主要聚居在远东、印度、欧洲中西部和北美东中部这四个地区，其人口密度超过 100 人/km^2。其他地区人口密度较低，比如亚马逊河盆地、加拿大北部、澳大利亚的沙漠地区等，都是人烟稀少，人口密度在 2 人/km^2 以下(表 19-6、表 19-7)。

表 19-6 世界人口密度(人/km^2)

项目	总人口 /100 万	1970 年人口密度	总人口 /100 万	1994 年人口密度
世界	3609	14	5629	42
欧洲	649	62	726	63
亚洲	2081	47	3403	107
非洲	253	12	708	23
北美洲	323	13	413	17
南美洲	190	11	314	18
澳大利亚	12	1.5	21	3
中国			1208	126
日本			124	330
英国			58	238
美国			260	28

引自佟新著 2000

表 19-7 各大洲人口占世界人口的比重

年份	世界	非洲	北美洲	拉丁美洲	亚洲	欧洲	大洋洲
1990	100.0	7.7	5.2	4.1	55.3	27.3	0.4
1925	100.0	7.7	6.6	5.2	53.5	26.5	0.5
1950	100.0	8.0	6.7	6.5	55.2	23.0	0.5
1975	100.0	7.9	6.3	7.9	57.7	19.6	0.5
1994	100.0	7.9	7.3	8.4	60.4	12.9	

引自佟新著 2000

3) 人口的城乡分布不均衡。随着社会经济的发展，世界人口的城市化进程很快，19 世纪末只有不到 3%的世界人口居住在城市中，而目前已有 1/2 的人口生活在城市

中。但世界人口的城乡分布不均衡，发达国家或地区已基本完成人口城市化，城市人口占总人口的 75%左右。而发展中国家正在经历人口的城市化过程，城镇人口仅占总人口的 35%左右。比如，1996 年英国城市人口高达 90%，而埃塞俄比亚城市人口仅为15%。

(3) 中国人口分布特征

1) 人口密度高。中国是世界上人口最稠密的国家之一。人口密度从 1949 年的 57 人/km^2 增加到 2000 年的 132 人/km^2，增加了 2.32 倍。并且人口密度的地区差异很大。平原、盆地人口多，山地、高原人口少。比如 2000 年人口密度最高的上海(2657 人/ km^2)与人口密度最低的西藏(2.1/km^2)相比较，二者相差 1265.24 倍。

2) 人口分布地区极不均衡。我国人口东部多、西部少，地理分布不均衡。以黑河一滕冲为界，该线东南侧土地面积仅占全国的 42.9%，但人口却占到 94.2%以上(1990 年)，二者人口密度相差高达 20 多倍。

3) 人口的城市化水平较低。2000 年我国城镇人口仅占总人口的 36.09%，远低于发达国家的城市化水平。

(三) 人类种群的发展趋势

1. 世界人口的发展趋势

1999 年世界人口超过 60 亿，从全球看，世界人口的发展趋势主要呈现以下特征：

1) 出生率下降，增长率减缓。近年来大量的调查和统计资料显示，世界人口出生率在下降，生育控制也越来越严。现在发展中国家的出生率一般在 24‰~27‰，而发达国家在 20‰以下。随着出生率的下降，人口的自然增长率也出现了减速现象，而且这种减速将持续下去。

2) 人口压力巨大。虽然世界人口的出生率在持续下降，自然增长率也开始减速，但由于人口基数越来越大，人口净增值也越来越大。世界每年要新增近 1 亿人口，且90%出生在发展中国家或地区，尤其是亚非拉的发展中国家或地区，给这些国家或地区的可持续发展造成巨大压力。

3) 人口城市化进程加快。伴随着城市化迅速推进，城市人口发展很快。1925 年世界城市人口为 4.05 亿，占总人口的 21%。1950~1980 年城市人口由 6.98 亿增至 18.7 亿，从占总人口的 28.1%增至 42.2%。特别是发达国家城市人口增加更快。1950 年美国城市人口占总人口的 64%，到 1980 年上升到 88.3%。同时，英国由 77.9%上升到88.3%、法国由 55.4%上升到 78.3%、日本由 35.8%上升到 63.3%、中国由 11.0%上升到29.37%。但世界各地的城市化程度不平衡，1983 年北美洲城市人口占总人口的 74%、大洋洲占 72%、欧洲占 65%，拉丁美洲占 65%、亚洲和非洲仅占 27%。

4) 人口老龄化趋势明显。近年来，随着社会经济的迅猛发展，特别是医疗技术的进步，人口出生率下降和平均寿命延长(目前世界人口平均寿命为 60 岁)，导致老年人口在总人口中的比例上升，形成人口老龄化。1990 年世界上已有 50 多个老年型国家，预计到 2020 年全世界除非洲撒哈拉以南十几个国家不会出现老龄化之外，其他众多国家

都将步入老龄化国家之列。因此，人口老龄化已成为全球性问题。

2. 中国人口的发展趋势

据 2000 年第五次全国人口普查结果，建国以来我国人口发展的基本特征是：

1) 人口增长速度快。新中国成立后，由于社会政治稳定和医疗卫生条件不断改善，加之一度对人口再生产规律认识不清，使人口出生率高速增长，人口的自然增长率除 3 年自然灾害外，一直保持在 20‰以上，由此导致人口总量的猛增。1949 年到 1973 年净增 3.5 亿，1974 年中国人口超过 9 亿。自 20 世纪 70 年代政府大力提倡计划生育以来，我国人口出生率和自然增长率下降幅度很大，分别从 1949 年的 36.00‰和 16.00‰下降到 1999 年的 15.23‰和 8.77‰。但总的看来，解放后人口发展还是很快的，人口的自然增长率也是比较高的。

2) 人口增长规模大。1949 年我国已达 5.4167 亿人口，新中国人口的发展就是在这个相当庞大的基数上开始的。这也就在客观上决定了我国人口增加的绝对量、增长规模必然很大。从 1949 年到 2000 年的 51 年间，共计增加 7.5366 亿人口，致使全国人口高达 12.9533 亿。因此，即使出生率和自然增长率都维持在较低水平上，每年还要净增加 1279 万人。今后 30 年中国人口仍将继续增加，预计到 2030 年中国人口达到最高峰 16 亿，人口数量实现零增长。

3) 人口老龄化速度快。由于我国人口的生育水平迅速下降和平均寿命延长，使中国人口年龄构成中少年儿童比例下降，成年和老年人口相对增多。1964 年至 2000 年，0~14 岁人口比例从 40.7%下降到 22.89%，65 岁以上老年人口从 3.6%上升到 6.96%。因此，人口的年龄结构已从成年型向年老型人口方向转化。并且，我国人口老龄化来势凶猛。据联合国统计，1950~2000 年世界老年人口增长为 176%，而中国为 217%；2000~2025 年世界老年人口增长为 90%，而中国为 111%。据美国有关统计显示，65 岁及以上人口比例从 7%上升到 14%需要的时间是：法国为 115 年、瑞典为 85 年、美国为 66 年、英国为 45 年，而中国只需要 25 年。

4) 城镇人口比重低。人口的城乡结构反映一个国家或地区城市化水平的高低，也与其经济发展水平密切相关。1949 年我国城镇人口仅占总人口的 10.6%，而且主要分布在东部沿海、沿江地区，广大的中西部地区城市人口很少。随着经济的不断发展，我国城镇人口逐年增加。2000 年城镇人口占总人口的 36.09%，比 1949 年增加了 25.4 个百分点。但我国城市化的水平还比较低，不仅低于发达国家的平均水平(75%，1996)，也低于欠发达国家的平均水平(35%，1996)。

(四) 地球环境的人口容量

人口的急剧增长给生态系统造成了极大的冲击和压力，使人类的生存空间越来越拥挤。人类还会无限制地增长下去吗？这是全人类共同关注的问题。从生态学的角度看， 任何生物种群都不可能无限增长，存在着最大容量问题。具有智慧的人类种群虽然可以通过改造环境，在一定程度上提高人口的环境容量，但作为生态系统中的一员，

人类种群不可能无限增长，仍要遵从自然法则的制约，“容量问题”还是客观存在的。地球究竟能容纳多少人口？这个问题目前在理论、方法和概念上都没有统一。由于估算口径不同和人口容量参数的不确定性，造成人口容量差别很大。目前对世界环境人口容量的估算并无定论，常见的几种人口容量估算方法如下：

1. 环境对人口的承载能力

地球环境对人口的承载能力(carrying capacity)，或称人口环境容量，是指地球生态环境对人口的最大抚养能力或负荷能力。通常，我们所说的地球环境的人口承载能力，并不是指生物学上的最高人口数，而是指一定生活水平和环境质量状况下所能供养的最高人口数，其随生活水准的不同而异。因此，如果把生活水平的标准定得较低，甚至维持在生存水平，则人口环境容量就可认为接近生物学上的最高人口数；如果生活水平的目标定得恰当，人口环境容量就可认为是经济适度人口。国际人口生态学界将世界人口容量定义为：在不损害生物圈或不耗尽可合理利用的不可更新资源的条件下，世界资源在长期稳定状态下所能供养的人口数量的大小。这个定义强调了人口容量是以不破坏生态环境的平衡与稳定，并保证环境资源的永续利用为前提。按照这一定义估算，地球可以容纳 150 亿~200 亿人口。

2. 生物生理人口容量

把人均消耗水平压缩到人类温饱水平，即只能满足人的生理必需水平。按这样估算的人口容量是最大的，在实际估算中只使用一个主要参数，即维持人口数量的食物产量。由于世界上许多人口已超过这一需求水平，因此，按这个水平来估算是没有意义的。比如有些学者从地球的年初级生产量为 2.76×10^{18}kJ，按每人每天需要摄入 9196J，一年需要 3.34×10^{6}kJ 估算出，地球可以养活 8000 亿人口，这种方法显然是脱离实际的。

3. 根据现有消费水平等计算

根据现有消费水平，参照可预期的生活水平、生产力水平、资源的储量和消耗量情况，来估算未来的人口最大容量。比如，联合国粮农组织曾经对发展中国家土地承载能力进行估算，其基本前提是各国人口达到标准的人均营养需求，所有可耕地均用于种植粮食，然后按高、中、低三种不同的农业投入水平，估计每公顷土地可供养的人数。这种估算方法虽有较大的现实意义，但也存在着许多不确定的因素，诸如可耕地中有多少用于粮食生产，以及投入的增加，是难以预测的。据里斯和惠特克估计，如果全球人口都享受美国人的生活水平，那么在当前生产力和技术水平下，地球可以供养的适宜人口为 10 亿左右；如果按照比较节俭的欧洲人的生活标准计算，世界人口适度为 20 亿~30 亿。根据这种估算方法，目前世界早已超出人口的最佳数量。

4. 适度人口容量

适度人口是指符合社会、经济发展和生态环境条件改善的满意目标人口。但由于“适度”本身是一个非常灵活的词条，因此，“适度人口容量”是一个很笼统的概念。

究竟多少人口才算适度，难以确定。目前多数学者认为，以 100 亿左右为适度。比如 1972 年联合国人类环境会议公布的背景材料认为，全球人口稳定在 110 亿或略多一些，这是能使全世界人民吃得较好，并维持合理健康而不奢侈的生活水平的人口限度。

5. 中国人口环境容量

对中国人口环境容量问题，很多学者作过研究。马寅初早在 1957 年就提出中国最适宜的人口数量为 7 亿~8 亿；同年孙本文教授也从中国当时粮食生产水平和劳动就业角度，提出了相同的看法。1980 年田雪原、陈玉光从就业角度研究了中国适度人口数量，认为 100 年后中国经济适宜度人口应在 6.5 亿~7.0 亿之间。胡保生等应用多目标决策方法，选择社会、经济、资源等 20 多个因素进行可能度和满意度分析，提出中国 100 年后的人口总数应保持在 7 亿~10 亿为好。宋健等从食品和淡水资源的角度出发，估算了 100 年后中国适宜度人口应在 7 亿或 7 亿以下，若按发展中国家平均用水标准，则应控制在 6.3 亿~6.5 亿之间。据此，可以认为我国的人口环境容量应在 6.5 亿~8.0 亿之间。目前我国 12.9533 亿人口已经显得过多，超过了我国生态系统的承载能力，使资源承载达到了临界点，成为可持续发展的重大问题与制约因素。

第三节　人类生态系统

人区别于一般动物，既具有自然人的一面，又具有社会人的一面，人类生活的环境不仅有自然环境，还有人工环境和社会经济环境，因此，人类生态系统不同于自然生态系统，它是一个社会-经济-自然复合生态系统(social-economic-natural compound ecosystem，SENCE)，即人类生态系统是由自然生态系统和人工生态系统构成的复合生态系统。

一、人类生态系统的概念

人类生态系统是以人为主体的生命系统与环境系统在特定空间的组合，是人与其共存的时空中众多的处于相干状态的构成要素或子系统通过协同作用而形成的耗散结构。它是一种开放的立体交叉网络体系，不断与外界环境进行着物质、能量、信息的交换，在物质流、能量流、信息流不息的输入、输出过程中，通过涨落、自组织而实现系统在时间、空间与功能上的有序、稳定。这种以耗散结构为特征而运行的人类生态系统一方面促进并控制着人类的活动与发展，同时系统的物质流、能量流、信息流的循环、流动、传递过程又受到人类活动与发展的干预和改变。人类的数量、素质、认识、决策、行为和自我控制能力深刻地影响着人类生态系统的稳定性和有序程度；而人类生态系统的稳定、涨落、自组织和有序化程度又极大地关系着人类社会的发展进程，影响着人类社会与自然界的相互关系。这个以人类为主体的复杂的生态系统是更高层次的系统。构成要素或子系统间的相互作用决定着系统整体功能的稳定和有序；而系统的整体功能又规定着各构成要素或子系统的行为以及它们之间的相互作用。简言之，人类生态系统是社会-经济-自然复合系统，它是以人的行为为主导，自然环境为依托，

资源流动为命脉，社会体制为经络的人工生态系统。

二、人类生态系统的结构

人类生态系统的结构是由社会生态系统、经济生态系统和自然生态系统耦合而成的复合系统，人类处于该复合系统中心(图 19-7)，作用于人类这一主体之外的为人类生态环境。

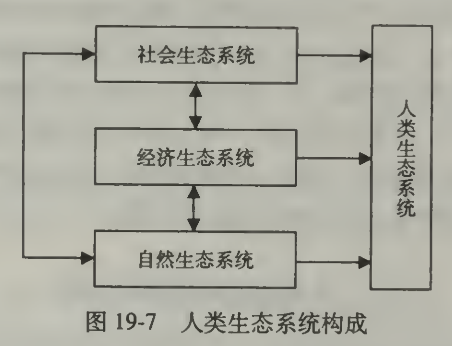


图 19-7　人类生态系统构成

(一) 人类生态系统的组成

1. 人类

在人类生态系统中，人既是生产者，又是消费者，同时还是环境的调控者。处于人类生态系统的核心。人类在与周围环境进行物质、能量、信息交换的过程中存在和发展着，人类构成食物链中最重要的一环，是系统中最活跃的因素。

2. 人类生态环境

人类生态环境是指作用于人类这一主体的外在影响和力量的总和。它包括自然环境、人工环境和社会经济环境，它制约着人类的生存和发展。

1) 自然环境。自然环境，又称物理环境，是指光、热、水、土、大气、气候等无机因素和植物、动物、微生物等有机因素共同组成的自然体系。它为人类的生存和发展提供适宜的空间和资源，是人类赖以生存和发展的物质基础。

2) 人工环境。人工环境是指人类聚落形成的环境。它以人类的聚集和活动作为环境的主要特征和标志。有史以来，人类生活环境逐步经历了自然环境→农庄村镇→工矿城市→现代化城市这样一个发展过程。在这些环境中人为因素逐渐加强，人类有计划、有目的地创造自己的生活环境，这一切都是人类利用自然、改造自然的结果。今天，自然界处处受到人类活动的干扰，处处都有人类创造的新东西。可以说，凡是人为进行改造、控制和管理的环境都可以看做是人工环境。比如农田、城市、道路、水库、运河、工厂等。

3) 社会经济环境。社会经济环境是指社会的生产方式、生产工具和生产关系发展水平，也包括政治经济体制、文化教育、社会风气等，它由物质和非物质形态的环境两

部分构成。

(二) 人类生态系统的结构

人类生态系统的结构即是组成系统的各子系统、各组成成分在空间上的配置和联系。人类生态系统通过系统各组成成分之间、各子系统之间的有机组合(比如通过生物地球化学循环、投入产出的生产代谢以及物质能量供需关系和废物处理等)，形成一个具有内在联系的统一整体。一方面，自然生态系统以其固有的成分及其物质流和能量流运动，控制着人类的社会经济活动；另一方面，人类又具有能动性，人类的社会经济活动在不断改变着物质循环与能量流动过程，对人类生态系统的发展和变化起着决定性的作用。二者相互作用、相互制约，组成一个复杂的以人类活动为中心的复合生态系统。这一系统结构复杂、层次有序，并具有多项反馈功能。

三、人类生态系统的功能

人类生态系统的功能与其结构相适应。在人类生态系统中，自然生态系统具有资源再生功能和还原净化功能。它为人类提供自然物质的来源，接纳、吸收、转化人类活动排放到环境中去的有毒有害物质，自然系统中以特定方式循环流动的物质和能量，比如碳、氢、氧、氮、磷、硫、太阳辐射能等的循环流动，不仅维持着自然生态系统的永续运动，而且也是人类生存和繁衍不可缺少的化学元素；自然系统的水、生物、矿物等其他物质通过生产进入人工生态系统，参与高一级的物质循环过程。它们都是社会经济活动不可缺少的资源和能源。显然，自然生态系统是人类生存和发展的物质基础，而人工生态系统具有生产、生活、服务和享受等功能。

人类生态系统与自然生态系统的本质区别是人类生态系统以人类为核心。在功能方面的差别，主要表现在人类生态系统为满足人类自身的需求，比如衣、食、住、行等的消费，必须不断地加强和提高社会生产。因此，社会经济环境不同于一般的环境因素， 它在人类与环境的关系中，往往起到决定性的制约作用。

(一) 人　口　流

人口流是指人口的出生、死亡、迁移等过程。人类作为人类生态系统的核心和最活跃的要素，其数量、素质、认识、决策、行为和自我控制能力等，深刻地影响着人类生态系统的稳定性和有序程度。

(二) 人类生态系统的能量流

自然生态系统的能量流动，最初都开始于太阳辐射。生产者(绿色植物)通过光合作用，把光能转化为化学能，通过食物链能量从一个营养级流向另一个营养级。

人类作为杂食动物，既可以吃植物，也可以吃动物，或者两者兼食。因此，人类可

以通过改变食物来选择自己在食物链中的位置。为了维持正常的新陈代谢，人类自身需要不断地补充能量，这些能量主要来自于粮食和副食品。据估算，一个完全以植物为食的人，约需要 1/4hm^2 的土地来养活自己；一个完全以肉为食的人，约需要 4hm^2 的土地来养活自己。面对庞大的世界人口，自然生态系统，无论那种类型，比如森林、草场、海洋等，都不可能完全满足和保障人类的需求。为了生存与繁衍，人类逐步从捕猎野兽、采集野果，开始学会种植和驯养，直到今天的现代化工农业生产。

农业生态系统是一种半自然生态系统，除太阳能外，为保证农作物高产，还必须输入辅助能量，包括耕种、灌溉、施肥、遗传育种、病虫害防治等，据估算，在发达国家的农业生态系统中，这些辅助能源的输入几乎和太阳能一样多，高达 41 800~167 200kJ/m^2。

工业生态系统和城市生态系统，它们都是纯人工生态系统，其能源主要是矿物燃料。矿物燃料究其本源，同样来自生物，可以说它是生物能库，是大自然赐予人类的宝贵财富。

由上可知，人类生态系统与自然生态系统在能流方面的区别，主要表现在人类生态系统不仅存在着沿食物链流动的系统内部能流，还存在着大量不通过食物链的、用于生产和生活的系统外部能流(辅助能)，它主要来源于矿物燃料，它的开采过程、利用及燃烧过程中产生的新物质等，都是造成当前全球生态环境问题的根源。

(三) 人类生态系统的物质流

人类生态系统是一个复杂的巨系统，它通过社会-经济-自然复合生态系统，对自然资源进行开发利用，为人类生产大量的生活资料，满足人类的需求。比如自然生态系统为人类提供粮食、蔬菜、纤维、油脂、木材、肉、蛋、奶等，并接纳各种废弃物质；工业生态系统为人类提供大量的工业制成品；社会生态系统为人类提供教育、医疗、保健、娱乐、信息等社会服务。

与自然生态系统中物质循环沿食物链进行不同，人类生态系统的物质循环需要依赖外界。即不断地从自然环境中开发利用自然资源，进行社会生产，同时又不断地将大量的废物排放到自然环境中。由于人口急剧增加，人类不得不加强对生态系统的干预，加速系统循环，以获得更多的物质、能量，满足人类所需。但违背客观规律的干预，必然适得其反，引发一系列生态环境问题。比如，矿产资源的开发利用对人体健康的影响，有人比较海水以及古代和现代人体中的痕量元素(人体中低于 0.01 的元素)后，发现现代人体中的铅、镉、锡、汞、银等非人体必需的痕量元素明显增多(表 19-8)，它们在人体中有隐藏毒性，当超过某一阈值时，人体便会中毒，甚至死亡。

再比如杀虫剂 DDT，是瑞典人缪勒 100 多年前发明而获得诺贝尔奖，由于严重污染，DDT 现已被禁用。据美国科学家在长岛河口的实验，大气中 DDT 浓度很低(0.3×10^{-6} μg/g)，经过食物链放大，进入人体的 DDT 浓度达大气的 1000 万倍以上。

表 19-8　海水、古代和现代人体中的痕量元素

元素	海水 /(μg/kg)	原始人 /(μg/g)	现代人 /(μg/g)	差异原因
铅	4	0.01	1.7	含铅汽油
镉	0.03	0.001	0.7	精制糖、水管
锡	3	<0.001	0.2	锡罐
汞	0.03	<0.001	0.19	杀虫剂
银	0.15	0.001	0.03	餐具

大气 DDT 0.03×10^{-6}μg/g —富集1.3万倍→ 浮游生物 0.04μg/g —富集14.3万倍→ 小鱼 0.5μg/g —57.2万倍→ 大鱼 2μg/g —(7种平均)→ 水鸟 25μg/g —1000万倍→ 人体

由此可见，在人类生态系统中，人体对环境中的污染物具有惊人的富集和生物放大能力。因此，对环境污染的危害应有清醒的认识。

(四) 信　息　流

在人类生态系统中，蕴含着各种信息。包括系统各组分之间的营养信息、物理信息、化学信息、行为信息等多种信息。特别是人类可以通过一定的信息技术手段，在不断地搜集、生产、加工、存贮、传递和利用各种信息，从而形成人类信息。比如利用气象信息，指导农业生产和病虫害管理等。这些信息对人类生态系统的调节具有重要作用。

(五) 价　值　流

价值流是指价值形成、增值、转换和实现的过程。在人类生态系统中，由于人类的参与，向系统输入了大量劳动力，从而产生了新价值。并且，这种价值附着在产品上，随产品的加工生产过程，沿食物链和生产链不断增值。因此，价值流是人类生态系统的重要功能。

上述这五方面功能流，既体现了人类生态系统的功能，也体现了人类生态系统不同于自然生态系统的特征。但作为自然生态系统基本功能的能量流、物质流和信息流，在人类生态系统中也同样起着十分重要的作用，只有这三个基本流畅通了，人类生态系统才能得以正常运行。

四、人类生态系统的主要特征与分类

(一) 人类生态系统的主要特征

1) 人类的强烈干预。由于人类生产生活对环境的强烈干扰和带来的人工技术产品(建筑物、道路、运河、水库、公用设施等)完全改变了原有自然生态系统的结构与面

貌，人类的经济、社会活动和人类种群增长成为影响生态系统的决定性因素，因此人类是这个系统中最活跃、最积极的因素，可通过人为的调节和干预使系统不断发展。

2) 复杂的开放系统。人类生态系统的能量交换和物质循环是一个开放系统。该系统需要依靠外部环境不断输入能量、物质，在系统内部经过人类生产消费和生活消费所排出的废弃物，需要依靠人为技术处理或向环境排放，利用环境的自净能力分解循环。一旦其排出的废弃物超过环境的自净能力，就会引起环境恶化和生态破坏。因此，人类生态系统的稳定性不仅取决于生态系统的容量，也取决于与外界进行物质交换和能量流动的水平。

3) 功能多样化。人类生态系统是一个复杂的多层次开放系统，它可分为社会、经济、自然三个子系统。这 3 个子系统又由若干个不同的子系统组成，所以各层次内部以及各层次子系统之间的关系非常复杂。比如经济子系统，就有生产结构、消费结构、产业结构等。因此，人类生态系统的功能是多样的，比如生产、生活、还原、自净、反馈、调控等。

4) 受自然生态规律和社会经济规律双重制约。人类生态系统是在自然生态系统的基础上，经人类加工改造而形成的适合人类生存和发展的复合生态系统。它既不是单纯的自然生态系统，也不是单纯的人工生态系统， 而是自然和人工相耦合形成的复杂的开放生态系统，与外界有着许多的能量与物质的交换。因此，人类生态系统的演化既遵循自然发展规律，也遵循社会经济发展规律。为满足人类发展的需求，它既具有自然系统的资源、能源等物质循环的功能，又具有人工系统的生产、生活、享受等的功能。

5) 具有一定的承载能力。人类生态系统的承载力是有限的，超负荷则生态平衡被破坏。因此，人类生态系统具有脆弱性、平衡的不稳定性以及在一定限度内的自我调节功能。该系统在长期演变过程中逐步建立了自我调节系统，可在一定程度内维持系统自身的相对稳定，同时，该系统还具有人工调节功能，对外界的冲击能够通过人工调节进行补偿和缓冲，从而维持系统的稳定性。

6) 发展的时滞性与不可逆性。人类生态系统是复杂的非线性系统，其因果关系复杂而不明显。系统目前的状况或问题可能是很久以前由于某些原因造成的，若采取的治理措施或发展对策不当，又会产生新的问题，而且时间延滞可能很长。同时，人类生态系统是动态系统，各级系统状态处在不断的发展变化中，而且这种发展变化过程在时间和空间上是不可逆的。因此，进行科学的管理与决策是保证人类生态系统可持续发展的关键所在。

(二) 人类生态系统的分类

1) 按区域分类。从地球这一复杂的大系统来看，任何一个有人类居住的区域都可以视为一个人类生态系统。而区域又可分为不同的等级。比如地球可以视为一个全球生态系统，五大洲可视为五个人类生态系统，每个国家或地区也可视为一个人类生态系统，还可以再分为更小的区域人类生态系统。

2) 按聚落类型划分。聚落，即居民点，也称为社区。它是人类定居进行生产和生

活的场所，也是人类进行经济活动和文化活动的场所。按聚落类型，人类生态系统可分为城市生态系统和农村生态系统。

五、人类生态系统的调控

随着人类利用自然水平的不断提高以及人口增长的持续压力，人类生态系统的正常运转已经受到了威胁，因此，对其进行行之有效的调整是十分必要的。对人类生态系统进行调控是一个复杂而持久的过程。

(一) 人类生态系统的调控机制

1. 人类生态系统的自调节机制

1) 自然生态系统的自调节机制。自然生态系统本身具有很强的自调节功能，这种自调节功能在很大程度上保证了人类生态系统的正常运转，并使之不发生不可逆的恶化。比如当人们向河流中排放污染物时，水体中的物理、化学、生物作用可以使许多类型的污染物降解，失去有害作用，这就是通常所指的水体的自净作用和水体的同化容量。同样，大气等环境载体也具有较强的污染物稀释、扩散作用。在一定范围内，自然生态系统在干扰后可以自行恢复。但自然生态系统的自调节机制是有一定限度的，并受到诸多因素的影响，如果人为干扰的强度超出了这一限度，则这种自调节能力的恢复可能要经过一个相当长的时间，甚至根本无法恢复。

2) 人类社会的自调节机制。人，作为一种智慧动物，具有较自然界更强的自调节机制。人类社会的自调节机制相对于动物来说要复杂得多。因为人类具有预测未来的能力，有进行自我约束的法律及道德规范等。比如人类对自身种群数量的控制以及在困难处境中的节俭都是人类自调节的表现。

2. 人类生态系统的被动性调控和能动性调控

1) 人类生态系统的被动性调控。被动性调控是人类在自然环境的压力下为了自身的生存而不得不进行的一种对自然环境的有限度的调控，它是与能动性调控相对应的、消极的、低层次的调控。在人类社会早期，被动性调控是人类生态系统调控的主要方式，随着科学技术的进步与人类知识水平的提高，这种调控所占的比例已逐步下降。但就局部来说，被动性调控在某些欠发达地区还发挥着重要作用。

2) 人类生态系统的能动性调控。能动性调控是人类生态系统调控的最高层次，它是人类自身发展的需要，也是人类生态系统维持的需要。它是人类社会发展到一定阶段的产物，其强度和广度也随着人类社会的发展而不断增加。能动性调控有两种方式：一种是完全从人类自身的利益出发，较少考虑自然环境可能受到破坏的调控，这种调控的影响是多方面的，古往今来不乏引起严重不良生态环境后果的事例，比如毁林开荒、大规模抽取地下水等；另一种是从人类生态系统的整体性出发，既考虑人类自身的发展需求，又兼顾系统正常运转的调控，近年来为人们所广泛关注的可持续发展思想就是这种

调控的一种有效方式。

由于人类能动性调控存在着导致生态环境发生不可逆恶化的危险，加之这种恶果往往不是直接作用于调控者自身，而是作用于全社会，因而人类对这种调控应当十分谨慎，应当采取措施加以引导和管理。

（二）人类生态系统的调控原理

王如松(1996)提出人类生态系统的 10 条调控原理：

1）胜汰原理。系统的资源承载力、环境容纳总量在一定时空范围内是恒定的，但其分布是不均匀的。差异导致竞争，竞争促进发展。优胜劣汰是自然及人类社会发展的普遍规律。

2）拓适原理。任一区域、企业或部门的发展都有其特定的资源生态位。成功的发展必须善于拓展资源生态位和调整需求生态位，以改造和适应环境。只开拓不适应，缺乏发展的稳度和柔度，只适应不开拓，缺乏发展的速度和力度。

3）生克原理。任一系统都有某种利导因子主导其发展，都有某种限制因子抑制其发展，资源的稀缺性导致系统内的竞争和共生机制。这种相生相克是提高资源利用效率、增强系统自身活力、实现可持续发展的必要条件，缺乏任一机制的系统都是没有生命力的系统。

4）反馈原理。人类生态系统的发展受两种反馈机制控制，一是作用和反作用彼此促进，相互放大的正反馈，导致系统无止境增长或衰退；另一种是作用和反作用彼此抑制、相互抵消的负反馈，它使系统维持在稳态或亚稳态附近。正反馈导致系统发展，负反馈维持系统稳定。一般地，在系统发展的初期正反馈占优势，在晚期则负反馈占优势。可持续发展的系统中正负反馈机制相互平衡。

5）乘补原理。当系统的整体功能失调时，系统中某些组分会乘机膨胀成主导组分，使系统歧变；而有些组分则能自动补偿或替代系统发挥原有功能，使整体功能趋于稳定。系统调控中要特别注意这种相乘相补作用。要稳定一个系统时，使补胜于乘，要改变一个系统时，使乘胜于补。

6）瓶颈原理。人类生态系统的发展初期需要开拓与发展环境，速度较慢；继而最适应环境，呈指数式上升；最后受环境容量或瓶颈的限制，速度放慢，越接近某个阈值水平，其速度越慢，系统呈 S 型增长。但人类能改造环境，扩展瓶颈，系统又会出现新的 S 型增长，并出现新的瓶颈。人类生态系统正是在这种不断逼近和扩展瓶颈的过程中波浪式前进，实现可持续发展的。

7）循环原理。系统中一切产品最终都要变成为废弃物，系统中任一“废弃物”必然是生物圈中某一生态过程有用的“原料”或缓冲剂。人类的一切行为最终都要反馈到作用者本身。物质的循环再生和信息的反馈调节是人类生态系统可持续发展的根本动力。

8）多样性和主导性原理。系统必须有优势种和拳头产品作为主导，才会有发展的实力；必须有多元化的结构和多元化的产品为基础，才能分散风险，增强稳定性。主导

性和多样性的合理匹配，是实现人类生态系统可持续发展的前提。

9) 生态发展原理。发展是一种渐进的、有序的系统发育和功能完善过程。演替的目标在于功能的完善，而非结构或组分的增长；系统生产的目的在于对社会的服务功效，而非产品的数量或质量。

10) 机巧原理。系统发展的风险和机会是均衡的，大的机会往往伴随着高的风险。强的生命系统要善于抓住一切适宜的机会，利用一切可以利用甚至对抗性、危害性的力量为系统服务，变害为利；善于利用中庸思想和对策避开风险、减缓危机、化险为夷。

(三) 多种手段在人类生态系统调控中的应用

随着人类社会的进步，对人类生态系统的调控手段也有了不断的发展与提高，其主要特征是手段渐趋多样化、从不自觉调控发展到自觉调控、逐渐转向更多地利用市场机制的方法进行调控。

1. 经济手段在人类生态系统调控中的应用

目前，国际上采用经济手段解决生态环境问题的步伐越来越快，方法也越来越多，比如排污收费、排污权交易等。事实证明，运用这些方法真正做到了谁污染谁治理，谁破坏谁恢复，谁受益谁补偿，既节约了资金，又改善了环境。通常，运用经济手段对人类生态系统进行调控的主要途径有：

1) 确定合理的贴现率。不同的市场贴现率将影响到消费和投资比例。贴现率高时，现期消费得到鼓励；贴现率低时，投资活动得到鼓励。因此，早在 20 世纪初，经济学家庇古就曾提出通过降低贴现率来保护自然资源。当然，如果贴现率过低，也将引发一些问题，它将促使投资规模过于膨胀，从而使资源与环境反而遭到更大的破坏。

2) 利用税收及补贴杠杆。征税是促进或限制自然资源开发利用、保护生态环境的重要手段。通过对资源开发利用中对资源、生态环境的破坏行为征收污染税和其他生态环境税种，将促进资源开采率的下降，达到保护生态环境的目的。比如，在我国一些地区，目前已经逐步开始试行征收资源税和环境生态补偿费，这些措施对于资源保护和合理利用将起到一定的促进作用。

与征税类似，也可以采取由政府提供各种不同形式补贴的方法，来促进或减缓资源开发的速度，达到保护资源和生态环境的目的。

2. 其他手段在人类生态系统调控中的应用

1) 确定最低安全标准。毕晓普等指出，为了防止重要资源受到不可逆破坏的危害，应当由专家确定最低安全标准，并纳入自然资源的费用效益分析中。

最低安全标准的概念最初是威力分析有关濒危生物问题而提出的。保存某种生物的最低安全标准是根据正好达到足够保证该物种生存下去的生物个体数目而确定的。因而可以估算维持最低安全标准的期望成本。对于任何生物，除非因维持最低安全标准而失

去的经济价值高到某个不可容忍的水平，否则其数量都不能允许低于最低安全标准。由此可见，最低安全标准同样可以用来对其他资源领域的问题进行分析，以防止资源的不可逆破坏。

2）制定标准、法规及进行生态规划。当政府发现资源开发利用方面存在问题时，还可以采取其他一些措施来进行干预。比如可以限制资源的销售或为资源的销售利用提供某种鼓励，可以限制或鼓励资源开采所需要的投人，可以制定有关资源保护、生态环境保护等方面的标准和法规，来限制人们的行为，也可以通过建立自然保护区、国家公园等来保护自然资源。

通过生态规划来调节人与自然的关系是十分重要的。美国环境质量委员会前主席彼得森提出指导这种规划的三项原则：一是人口数量必须相对地少，增长必须相对地缓慢；二是人类产品的构成必须保持相对的简单；三是人类的技术必须保持在相对有限的范围。

3）科学技术在人类生态系统调控中的作用。科学技术是人与自然相互发生影响的关键因素之一。在古代，由于缺乏科学知识、未掌握专门的技术，人类基本生活在自然的约束之下。在现代，随着科学技术的突飞猛进，人类大大提高了对自然的利用改造和调控能力。人类社会的发展历程表明，科学技术是生产力，而且是直接促进人类社会经济发展和人民生活水平提高的第一生产力。任何一次社会生产力水平的飞跃，无不建立在科学技术进步的基础上。科学技术既是社会发展的根本动力，也是生产力水平的基本标志。通过科技进步，可以促进整个人类社会的文明进程。

但是，科学技术在为人类带来福音的同时，也可给人类带来灾难。今天，人类所面临的全球性生态危机和环境污染问题，一方面源于科学技术的落后，另一方面源于不适当的科学技术运用。比如，灌溉技术的运用，大大提高了粮食产量，但也造成土地盐渍化等一系列问题。因此，为了从根本上解决生态环境问题，人类必须选择与生态环境友好的科学技术，即绿色技术，使科学技术真正成为造福人类的工具。

第四节　人类文明与自然环境的关系

作为社会的人，可以主动适应环境，并积极利用、改造环境。人类作为世界上分布最广的广布种群，自然环境中的生态因子往往不可能像限制动植物那样，限制人类的分布，因为人类具有智慧，人类用自己勤劳的双手创造了灿烂的文明，形成了自己的独特的文化，文化是人类适应自然环境的最重要的手段。

一、人类是地球环境演化的产物

众所周知，生物有机体是随着环境的演化而发生、发展的。作为生物进化最高阶段的人类，同样也是地球环境演化的产物。从人类的起源看，大约在距今 4000 万~3000 万年前，全球气候温暖湿润，地球上出现了首批灵长类动物——古猿。随后，大约在距今 2500 万年前的中世纪，气候变化、气温下降、雨量减少、森林面积缩小。环境的变化迫使一部分古猿不得不到地面上生活，由此开始了从猿到人的进化。从类人猿到猿人

的进化大约经历了 500 万年的时间，在距今 375 万~300 万年时古猿进化为早期猿人。之后，在距今 150 万~30 万年进化为晚期猿人；距今 30 万~5 万年进化为早期智人(古人)；距今 5 万~4 万年进化为晚期智人(新人)。新人居住在大陆各地，他们的脑容量和体形结构越来越接近现代人，并逐渐分化形成黄、黑、白等人种。从古猿到地面生活后，劳动和语言一起成为最主要的推动力，促使手脚分工，直立行走，猿的脑髓逐渐进化为人的脑髓，实现了从猿人到人的进化。人类具有思维能力和劳动能力，能不断地认识自然和改造自然。自人类诞生起，原始的自然环境就在人类活动的作用下不断发生变化。语言的产生、智能的发展，特别是火的发明、工具的制造与使用，极大地增强了人类对环境的适应能力，从而使人类种群得以大发展。在距今约 1 万年时，人口已超过 400 万。随着种植业、养殖业的出现和现代工业的发展，人类有了稳定的生存保障，在一定程度上摆脱了自然环境的束缚。从此开始了从适合自身需求的角度，来选择和利用改造环境。可见，人类的起源、演化、生存和发展与环境的演变密切相关，是环境造就了人类。

二、人类与自然环境的关系模式

自人类出现以来，就存在着人与自然环境的关系问题。在漫长的人类历史发展过程中，人与自然环境的关系经历了由被动向主动的转变，大体上可分成以下四种模式：

(一) 被动适应自然环境

在人类社会早期，由于生产力低下和人类自身的局限性，人对各种自然现象和过程所知有限。在神权论思想的束缚下，人们相信世界为神所创造，对自然规律一无所知。人们面对广漠而变幻的自然界，充满无知与恐惧。自然可随时随地使人类丧失其存在的可能，而人类只能被动地顺应自然环境，完全依赖自然环境而生存。这一阶段，人与自然环境的关系是“附属”关系，即人是自然环境的奴隶。

(二) 利用与改造自然环境

到了农业时代，随着生产力的发展，人类逐渐摆脱了神权论思想的束缚，改造自然环境的主动性、积极性不断提高。对自然环境的干预造成了始料不及的后果，比如巴比伦文明、玛雅文明的湮灭等。但总的来看，这一阶段人类对自然环境的改变尚未超出其容量，人与自然环境的关系仍维持着大体的平衡。这一阶段，人类强调的不是与自然环境的对立，而是与自然环境的协调与适应，比如我国老子、庄子所强调的“顺应自然”、“天人合一”的思想，就是这种关系的生动写照。

(三) 征服与统治自然环境

19 世纪，随着工业文明的兴起，科技与生产力迅速发展，人类在加快向自然索取

的同时，产生了征服自然、主宰自然的行为哲学，人类在大自然面前变的越来越神气，比如培根认为“知识就是力量”，主张通过获得知识达到对自然环境的统治，笛卡尔则宣称“人是自然界的主人和所有者”等。这些机械论与“人类中心主义”的观点，将人与自然环境的关系视为征服者与被征服者的关系，将人类视为自然环境的“主人”。然而，科学技术像一把双刃剑，在为人类带来了前所未有的物质文明的同时，也造成了各种各样的生态环境问题，如大气污染、温室效应、臭氧层破坏、水土流水、土地荒漠化、生物多样性锐减等。

(四) 与自然环境协调发展

从生态学的角度看，人类不过是地球生态系统中的一个组成成员，与其他物种一样是自然大家庭中的普通一员。人类与其他物种的关系是平等的，虽然人类具有智慧，可调节生态系统的功能，但这并不等于说人类优于其他生物，可以将自己视为自然环境的主宰，可以随心所欲地支配自然环境。比如著名生态学家利奥波德(Leopold)在《大地伦理学》一书中指出的：“大地伦理学改变人类的地位，从他是大地——社会的征服者转变到他是其中普通的一员和公民。这意味着人类应当尊重他的生物同伴而且也以同样的态度尊重大地社会。”“在人类历史上，我们已经懂得(我希望懂得)，征服者的任务是最终征服自己。”人类只有改变征服和统治自然的对立关系模式，重建人与自然的伙伴关系，寻求建立一种新的人与自然和谐相处的关系模式，自觉将自己视为自然大家庭中的平等成员，才能保住人类的生存根基。

三、对人类在自然界的地位和作用的不同认识

人类在自然界中的地位和作用，不同学者认识各异，大体可以归结为三种，即“虚无论”、“倒退论”、“伙伴论”。

(一) “虚　无　论”

虚无论者认为，随着科学技术的发展，生产力水平的提高，人类对自然界的征服能力将是无穷的，在利用改造自然方面，必将达到无所不能的程度，人最终一定能摆脱自然界的束缚，用技术圈、智慧圈代替生物圈。他们把自然界视为一个消极的任人摆布的客体，而人则是万能的，是大自然的主宰者。虚无论者无条件地强调“控制大自然”。显然，这是一种错误的“环境虚无论”观点。

随着科学技术的发展和生产力水平的提高，人类对自然界的控制能力无疑会越来越大，对自然环境的依赖性会逐渐减少。但这并不能证明生产力发展，可以使人类彻底摆脱对自然环境的依赖性。正如列宁所指出的“一般说来，人的劳动是无法代替自然力量的，正如俄尺不能代替普特一样。无论在工业或农业中，人只能认识和利用自然力量的作用，借助机器和工具等减少利用的困难”。无论生产力如何发达，人类总是代替不了自然环境，离不开自然环境。人可以把不可磨灭的烙印加之于围绕着自己的自然界，甚

至把整个自然外貌改变到无法辨认的地步，但绝对摆脱不了自然规律的束缚。科学技术的发展，使人类对自然环境利用的范围及深度发生变化、扩延，但人类必须依赖自然界所提供的资源。

(二)“倒 退 论”

倒退论者认为，生物圈运动过程极其复杂，人类作用于生物圈经过无数环节和回路产生的效应难以追踪和预测，因而人类不可能认识生物圈的运动规律，更不能有效地控制生物圈过程。为了摆脱环境危机，拯救人类，只能放弃造成环境污染与生态危机的工业化，“倒退生产”、“退回自然”。

众所周知，生产力的发展，科学技术水平的提高，是人类进步的基础。“倒退生产”、“退回自然”，只会带来贫困、愚昧、饥饿和瘟疫。环境问题的解决，生态危机的防治，绝不能采用使科学技术和生产力停滞甚至倒退的办法。相反，应该依靠科技，革新生产工艺。比如目前一些国家和地区，由于能源利用率低，既浪费了资源，又加重了环境污染。只有依靠科技进步，才能提高能源利用率。再比如人类开发新能源、新材料，发展无废料封闭式循环工艺，也只能依靠科技进步来实现。

(三)“伙 伴 论”

伙伴论认为，在人与环境的关系上，人具有重要的地位和作用，但必须抛弃以人为中心的价值观念，主张不仅要承认人类以外的价值，而且还必须把社会正义、社会平等的准则应用到生物圈内其他成分中去。比如森林、动物、河流、山岳、海洋、湖泊等， 它们都有道德权利，它们和人类同等重要，有着同样的尊严。蔚蓝的天空、茂密的森林、 清澈的河水、洁净的海洋，这是它们的权利。人类向天空排放有毒气体、向江河倾倒垃圾、砍伐森林等行为，侵犯了它们的权利，违犯了道德准则。Leopold 的《大地伦理学》，就是这种观点的代表作。利奥波德极力主张，人类必须重新审视和确立自身在自然界的地位，人类只不过是自然界的一个成员和公民，不能以征服者的姿态出现于自然界，而应在自然界这个大家庭中，做一个安分守己的善良公民。伙伴论强调：人类的生存与幸福取决于生态平衡，人类的生存与幸福不能以生态灭绝为代价。这种观点揭示了人与自然关系的本质和生态危机产生的根源。

事实上，人类及其实践活动对环境既有能动性的一面，又有受动性的一面。人类的生命、意识活动都起因于环境，人类的存在和发展也依赖于环境。人与环境就是在这种相互作用、相互制约中发展的。如果超越了人与自然的这种关系，就必然要遭到自然界的报复。从生态学的角度讲，人类作为地球生态系统中的一个组成成员，与其他物种的关系是平等的，虽然人类具有智慧，可调节生态系统的功能，但这种调节是有限度的， 不能超过环境承载力阈值。生态危机的出现，是人与自然系统的平衡遭到破坏的表现。面对生态危机，人类需要冷静地思考自己在自然界的地位，重新审视人与自然环境的关系，建立新的人与自然和谐相处的关系，使人与自然环境协调发展。

四、人类文化、文明与环境

（一）文化、文明与环境

从广义上来说，文化指人类社会历史过程中所创造的物质财富和精神财富的总和。从狭义上说，文化是社会的意识形态，以及与之相适应的制度和组织机构。文化是一种历史现象，每一社会都有与其相应的文化，并随着社会物质生产的发展而发展。文化具有民族性，通过民族形式的发展，形成的民族传统。文化的发展具有历史的延续性，社会物质生产发展的历史连续性是文化发展历史延续性的基础。

从文化与环境的关系看，文化的产生是人与环境相互作用的产物。文化是在人类对自然环境的认识与改造过程中发展和创造的。美国著名人类学家摩尔根把文化的发展分为 7 个阶段，即低级蒙昧社会→中级蒙昧社会→高级蒙昧社会→低级野蛮社会→中级野蛮社会→高级野蛮社会→文明社会。每个阶段的标志是与人类对自然环境的认识和改造密切相关的。其中，人类文化的低级蒙昧社会阶段，人类生活在原始的环境中，依靠野果为生；中级蒙昧社会阶段，始于人类火的使用；高级蒙昧社会阶段，始于弓箭的发明；低级野蛮社会阶段以制陶术的发明或制陶业的流行为标志；中级野蛮社会阶段以动物的饲养(东半球)、玉米的种植(西半球)以及使用土坯或石块进行建筑为标志；高级野蛮社会阶段始于冶金业；文明社会始于表音字母的发明和文字的使用。由此可见，文化的产生和发展，正是和人类对自然环境的认识、利用与改造同步的。在人类与自然环境的对立统一关系中，产生和发展了文化。因此，在人类文化的进程中，无一不包括了自然环境的因素，也无不打上了自然环境的烙印。

人类宏大的文化体系是由自然文化、民族文化和科学文化三个层次组成的。不同历史时期以不同的文化层次作为主流，并以此成为特定时代文化的主要特征。自然文化是人类进入社会生活时的第一文化，也是人类文化发展的基础。在人类文化发展的初期，人类的祖先在自然文化上表现出惊人的一致性，这就是原始的图腾文化。人们崇拜动植物、山、水、风、雨等自然现象，视其为神的化身。因为当时的人类十分脆弱，居住区域有限，对自然一无所知，根本没有能力改造自然，只能被动适应自然，这也就决定了原始的文化只能是自然文化。随着人类社会的发展，人类居住区域逐步扩大，对自然环境的了解加深。环境的差异和人类适应能力的增强，使自然文化的差异逐渐增大，导致文化发展的随机涨落与分异，使人类社会从部落、部族向民族形态逐渐演化，从而奠定了民族文化的基石。民族文化的产生，民族语言、文字的出现，使民族文化渐趋成熟，形成了绚丽多彩、风格各异的民族文化，构成了人类文化史上灿烂的篇章。科学文化植根于自然文化和民族文化的沃土中，它是科学技术发展的产物。随着人类利用、改造自然能力的增强和各民族之间交流的加强，自然文化、民族文化和科学文化相互融合，兼容并蓄，产生了更加绚丽多彩的先进的人类文化，推动了人类文明的进程。

（二）文化与文明的生态学涵义

从生态学的角度看，文化是指人类对环境的社会适应。由于人类具有明显的自然与社会双重属性，作为生物的人，对环境的生态适应使人类产生了不同的人种，在体质形态及生理、生态等特征方面出现了差异。作为社会的人，以不同的生产方式、生活方式，以自己创造的物质财富和精神财富来实现对环境的社会生态适应，从而形成了自然文化、民族文化和科学文化三个层次组成的宏大的文化体系。不同历史时代以不同的文化层次作为主流，并以此成为特定时代文化的主要特征。

人类之所以能够在漫长的历史长河中不断发展壮大，关键在于人类具有文化。人类通过文化的传授和知识的共享，一代又一代地传递，这就是文化的生态适应性。由于文化的进化而导致了整个人类社会的进化。由于有了文化，人类创造了灿烂的文明。

从生态学的角度看，文明是指某一地域文化对环境的发展过程。人类用文化来适应环境，也用文化来改造环境。环境与文化的协同进化，推动了人类文明的繁荣、发展。 但如果某一文化的发展过程与环境不协调，就会引起生态危机、资源耗竭等问题，当人类最终无法用文化来适应新的环境时，必将导致文化的退化和文明的衰亡。

（三）对人类文明兴衰的反思

有人曾用这样一句话来勾画人类历史进程：“文明人跨过地球表面，足迹所过之处留下一片荒漠。”这种说法虽然有点夸张，但用它来形容某些文明的消失，却是非常生动形象的。人类已经践踏了自身生活栖息的大片土地，这正是人类文明不断从一处移向另一处的主要原因，同时也是若干古文明衰亡的主要原因。

1. 巴比伦文明的衰落

公元前 3500 年，苏美尔人在两河(底格里斯河和幼发拉底河)流域的下游，即美索不达米亚，现今的伊拉克建立了城邦，这是人类文明的发源地之一。它也是世界上最早使用文字的社会，时间约在公元前 3000 年。使用文字的同时，苏美尔人在幼发拉底河流域修建了大量的灌溉工程。这些工程不仅浇灌了土地，而且防止了洪水。巨大的灌溉工程网提高了土地的生产力，使数百万的人从土地上解放出来，去从事工业、贸易或文化活动，他们创造了灿烂的古代文化——巴比伦文明。

然而，经过 1500 多年的繁荣后，到公元前 4 世纪辉煌的古巴比伦文明却衰落了。如今在当年古巴比伦城池的废墟上，除了荒漠和盐碱地，再也找不到当年古文明的恢弘气势。究竟什么是巴比伦文明消失的生态学原因呢?

巴比伦文明从人类利用水——灌溉开始，以不合理的灌溉所造成的土地盐渍化和灌溉渠道淤积的严重后果而告终。苏美尔人对森林的破坏，加上地中海气候冬季倾盆大雨的冲刷，使河道和灌溉渠道的淤积不断增加，人们不得不反复清除淤泥，甚至重新挖掘新的渠道，尔后又无奈地将其放弃，这样的不良循环，使得人们越来越难将水引到田中。与此同时，由于苏美尔人只知道灌溉，不懂得排盐，其结果使美索不达米亚的地下

水位不断上升，给这片沃土披上一层厚白的盐结壳，正如当时的文字记载的“earth turned white”。土地的恶化，使美索不达米亚葱绿的原野渐渐枯黄了，人口的增加和土地的恶化，使文明的“生命支持系统”濒于崩溃，并最终导致文明的衰落。历次朝代的更迭，都没能恢复土地的生产力、改善环境和资源的恶化状况，美索不达米亚地区永远地沦为一个人口稀少的穷乡僻壤。如今伊拉克境内的古巴比伦遗址，已是满目荒凉，只有沙漠、盐渍化土地。

2. 地中海文明的衰退

地中海文明包括环地中海地区的各个文明，主要有黎巴嫩地区的腓尼基文明、古希腊文明和古罗马文明，以及北非和小亚细亚地区的文明。历史从这个地区找到的例证很有说服力地证明了文明人是怎样毁坏自己的生存环境的。

腓尼基人的国土位于海边，由一条狭长的海滨平原和与之平行的一条狭长的丘陵地带组成。其自然条件非常优越，肥沃的土地、充足的降水、茂密的森林和草被，为腓尼基人提供了良好的发展机遇。有利的地形虽保护了好战的内陆部落的入侵，但却阻碍了腓尼基人的陆上发展。因此，向地中海发展成为当时的必然选择。腓尼基人很早就发现了遍布于其国土上的木材是一种畅销商品，它对于埃及和两河流域等大平原上的文明人来说更是弥足珍贵。于是随着木材交易的盛行，林地迅速减少。同时，长期在丘陵地上垦殖，肥沃的表土几乎被地中海冬日的倾盆大雨冲刷殆尽。公元前 8~前 6 世纪腓尼基人度过了他们的黄金时期，因为建立在海上权利庇护下的木材交易基础上的繁荣是难以持续的。待木材耗尽、支撑文明的表土也被破坏和冲刷得所剩无几，再加人口增加，饥荒来临，腓尼基文明变的越来越脆弱，开始衰退并逐渐消亡。如今的黎巴嫩已成为世界上最贫穷的地区之一，成为一片拥有丰富降雨量的沙漠。

在希腊，第一次大规模的环境破坏发生在公元前 680 年，由于人口的增加和聚居区的扩大，导致耕地减少和土地生产力下降。于是希腊人开始了其殖民政策，以求缓解本土的人口压力。尽管希腊人从其亲身的教训中痛切地意识到保护土壤的重要性，并从公元前 590 年开始采取了一系列的保护环境及鼓励生产的措施，但人口的巨大压力，迫使希腊文明在公元前 339 年的伯罗奔尼撒战争之后逐渐走向衰亡。

几个世纪以后，古罗马也出现了同样的问题。人口的增加引起植被消失、水土流失和洪水泛滥，导致肥沃的表土被河流带走，并在河口沉积下来。环境的恶化使强大的古罗马文明遭到毁灭性的打击，繁荣的都市一个接一个地消失于荒漠和沼泽中。比如庞廷沼泽在公元 400 年前曾是 16 个繁荣市镇的所在地。

综观地中海文明的兴衰过程非常相似：起初，文明在大自然漫长年代中造就的肥沃土地上兴起，持续进步达几个世纪；当越来越多的土地变成可耕地，或者当土地上原有的森林和草被遭到破坏时，侵蚀就开始剥离富于生产力的表土；随着持续的种植和渗透淋溶，消耗了大量作物生长所需的矿物质营养，生产力开始下降，随之其所支持的文明也开始衰退。

3. 玛雅文明的消亡

中美洲低地丛林的玛雅文明最早出现于公元前 2500 年。其后到公元前 450 年，人

口一直在稳定地增长，聚居地的面积和建筑结构的复杂度也越来越大。这是一个高度文明的社会，其文明的成就反映在他们对宇宙的认识程度，城市、建筑的艺术设计和独特深奥的玛雅文字方面。这样一个伟大的文明后来却突然消失了。第一个鼎盛时期的玛雅文明大约在公元 900 年时神秘消失；第二个鼎盛时期出现于两个世纪以后，在原地址以北 250km，也在十五六世纪前后突然消失了。

从玛雅文明消失的原因来看，早期玛雅文明的基础，据估计，是一种“swidden agriculture”系统，即每年 12 月至来年 3 月的旱季用石斧清除一片林地，在雨季来临之前用火烧，然后种植玉米和大豆，秋季收获。开垦的土地在使用几年后，因肥力下降和难以清除的杂草侵人而被撂荒。应该说，这种农业系统在热带地区非常适宜，生产力也很稳定。但因废弃的土地必须等到地力恢复，丛林再生后才能再次使用，这段时间一般需要 20 年或更长。所以，大片的土地只能维持一小部分人的生活。然而据考古证实，当时整个玛雅低地丛林中生活的人口最高接近 500 万，如此庞大的人口对其生存的土地来说，显然不可能依靠“swidden agriculture”系统来维持。据最近考古发现，后期玛雅社会已经产生了集约化程度很高的农业系统，这种系统的特点主要体现在对土地的治理上：在坡地，清理丛林后，土地被垒成了台地以防止水土流失；在低地采取网格状的排水沟，不仅可以排除洪水，而且可以利用沟中的淤泥来抬高地表。当时玛雅人主要的作物是玉米、大豆、棉花、可可等。但是，热带雨林地区的土壤侵蚀非常严重，在这种地区，一旦森林覆盖被破坏，土壤也就随之流失了。而农业用地、木材及燃料的需求，使森林消失不可避免；与之相关的是河流中的泥沙含量增高，造成低地和沟渠的淤塞，地下水面抬高。 此外，土壤有机肥补充不足，环境及资源恶化直接导致农业生产力下降。公元 800 年食品生产开始下降，粮食短缺和战争频繁，导致高死亡率使人口锐减，城市逐渐变成废墟， 一个高度发达的文明毁灭了。

4. 撒哈拉文明的消亡

撒哈拉原来是生命的绿洲，那里曾是一片雨量充沛、河川涌流、溪涧潺潺、草木繁茂的千里沃野。那里曾有人类定居，并为后人留下了珍贵的石刻和岩画。这些石刻和岩画，以生动写实的风格，向后人描绘了 5000 年前撒哈拉水草丰美的草原环境。如今撒哈拉早已失去昔日的绿洲风采，成为满目凄凉的大沙漠。因为这块沃土原有的水分平衡遭到无情的破坏。滋润这块土地的“季风雨”发生了历史性的变迁，而人类烧荒林地、过度放牧等自毁家园行为，最终导致了沙漠的形成。现在，沙漠仍像死神一样以每年 6km 的速度吞噬着中非的沃土，那里的人们依旧延续着传统的生产方式和生活方式，破坏环境中水的平衡，无节制地消耗森林、过度放牧，他们似乎不知道，他们在继续撒哈拉的悲剧。

5. 丝绸之路沿线文明的衰亡

新疆塔里木盆地的塔克拉玛干沙漠南部，曾是中国历史上最发达的地区之一。那里早在新石器时代就出现了灌溉农业，公元前 2 世纪张骞出使西域时，看到不少沙漠中的城郭和农田。此后，西域广大地区统一于汉朝中央政府管辖之下，发展屯田、兴修水利。作为西域交通要道的丝绸之路南道所经楼兰、且末、精绝、渠勒、于田、莎车等地

均有很发达的农业。到了唐代，农业更为发达，《大唐西域记》详细记载了焉耆、龟兹、莎车、于田等地的农业盛况。古楼兰王国以楼兰绿洲为立国之本，历经数个世纪，曾经繁盛一时。而今天，沿昔日繁华的丝绸之路掠过，古代的大片良田已沦为流沙，古城废墟历历在目，曾经浩瀚的罗布泊已经干涸，楼兰等绿洲已沦为不毛之地，丝绸之路沿线古文明已湮灭于荒漠的吞噬下。

丝绸之路沿线古文明的消失，固然与气候变干、降雨量减少、冰川融水萎缩、河流断流、水系改道等自然因素的波动有关，但土地的过度开垦、生物资源和水资源的不合理利用、天然植被的破坏及频繁的战争等人为因素，加剧了土地盐渍化、水资源的耗竭和环境退化，这是导致丝绸之路沿线古文明消失的主要原因。

6. 文明中心变动的启示

人类，无论是古代人还是现代人，都是大自然的子孙而不是自然的主人。人类如想保持相对于生态环境的优势，就必须使自己的行为符合自然规律。人类征服自然的企图，通常只会破坏自己赖以生存的生态环境。一旦生态环境受到破坏，人类的文明也就随之衰落。任何一个文明社会存在的基础，都在于一个持续的“生命支持系统”，文明持久的原因是保持了养育人类的土地的可持续性。

上述几个古文明衰亡的根本原因，就在于其赖以生存和发展的土地资源被破坏了。这些古文明衰亡的教训表明，某一区域的社会文化与生态环境组成了一个具有一定结构与功能的自然-社会-文化生态系统，文明则是该系统的一种动态平衡的时空状态。在自然-社会-文化生态系统中，人类通过文化对生态环境产生生态适应，并达到一种动态平衡，而文明则是某一文化对地域环境的社会生态适应的全过程。当支撑某一文明的生态环境发展变迁，人类可以通过文化的进步与更新，主要是科学技术和生产力的进步适应新的生态环境。随着文化的发展与进步，文明得以延续与发展。反之，当原有的文化已经不能适应新的生态环境，并缺乏进步与更新的动力时，变化了的生态环境已经支撑不了这一区域文明的时候，文明便衰亡了。换言之，古文明的衰亡的根本原因在于破坏了他们赖以生存和发展的资源基础。古文明消失的教训值得人类对长期以来沿袭的人与自然的关系模式进行深刻的反思，今天日趋严重的生态危机已向人类敲响了警钟。

第五节　人类面临的生态危机

从工业革命开始至今 200 多年来，伴随着全球经济的迅猛发展，人口爆炸、能源危机、食物短缺、资源耗竭、环境恶化和健康危机等这些困扰人类的生态问题日趋严重，人类生存与发展遇到了前所未有的巨大挑战。

一、人口爆炸

人口爆炸是指一定时间内人口的急剧增长使其数量超过了生存环境的负荷能力。人口的增长和动物种群一样，是由出生率、死亡率和自然增长率三种参数决定，而这三种

参数又受食物、空间等多种因素的影响。虽然人类具有智慧，能够创造财富而改善自己的生活，但人类作为生态系统的一员，并不能摆脱自然法则的制约。人类种群数量的增长受限于环境容纳量，然而，人类对这一客观规律的认识却经历了漫长的历程，并为此付出了沉痛的代价。尽管早在 200 年前，英国经济学家 Malthus 就提出过警告，要控制人口。可惜，人们却忽视了他的警告。直到六十年代科学家才呼吁“人口如继续增长，人口的浪潮将淹没我们自己。等待我们的将是苦难的明天，悲惨的岁月”。此后，有人形象地把人口的急剧增长称为“人口爆炸”。

(一) 人口爆炸的产生背景

人口爆炸是在近几十年人口急剧增长的形势下提出的。世界人口公元元年时约为 1.7 亿，在 20 世纪初为 16.25 亿，而 1999 年已达 60 亿。目前，全球人口正以每年近 1 亿的幅度增长，呈“人口爆炸”势头。预计到 21 世纪中期世界人口将达到 94 亿左右。人口的飞速膨胀，意味着对多种资源比如食物、淡水、矿产资源以及各种用途的空间等需求量的相应增大，这必然给地球上有限的自然资源和生态环境带来巨大压力，并引发一系列社会、经济和环境问题，特别是在那些经济发展水平低下、自然资源严重不足、农业人口占多数的国家或地区，人口与资源、经济、环境的矛盾就更加突出。人口若再继续无限制的发展下去，后果将不堪设想。难怪生态学家埃利希说：“一颗人类的炸弹正在威胁着地球。”

(二) 人口对生态环境的影响

1. 环境影响方程

经济生态学家用环境影响方程来表示人口对生态环境的影响，表达式为

$$I = P \cdot A \cdot T$$

式中：I 为影响；P 为人口；A 为富裕程度，即消费；T 为对环境不利的技术。

可见，人口数量、消费方式、消费水平和对环境不利的技术对生态环境造成的影响成正相关。

2. 人口增长对生态环境的压力

1) 对土地资源的压力。土地是人类赖以生存的物质基础，在人类生存所需的食物能量来源中，耕地上生长的农作物占 88%，草原和牧区占 10%，海洋占 2%。随着海洋的开发利用，海洋为人类提供的食物能量将会增加。目前，全球适于人类耕种的土地约 13.7 亿 hm^2，人均约 0.26 hm^2。但由于非农用地增加、土地荒漠化、水土流失、土壤污染等原因，促使人口增加与土地资源减少之间的矛盾越来越尖锐，人口增加对土地的压力越来越大。据联合国粮农组织研究，目前全球大约有 5 亿人口处于超土地承载力的状态下。人口过载对生态环境，特别是农业生态环境的威胁巨大。

2) 对水资源的压力。虽然水是可再生资源，但也有一定的限度。对于某一区域，水循环的自然过程限制了该区域的用水量，这就意味着人均用水量是一定的。如果人口增加，用水量就会相应增加，同时污水也相应增加，而人均水资源减少。如果要维持生活水准，则需要开采更多的水资源，造成水资源过度利用，使水资源缺乏日趋严重，甚至导致水荒。人均年可用水量 1000~2000m^3 的国家被列为水资源紧张国家，全球现有 100 多个国家缺水，其中有 40 多个严重缺水，十几个国家发生水荒。

3) 对能源的压力。能源为人类生产生活所必需。随着人口增加和经济发展，人类对能源的需求量越来越大。据统计，1850~1950 年的 100 年间，世界能源消耗年均增长率为 2%，而 20 世纪 60 年代以后，发达国家能源消耗年均增长率为 4%~10%，出现能源危机。现在，能源危机已成为一个世界性的问题。为了满足人口和经济增长对能源的需求，除了矿物燃料外，木材、秸秆、粪便等都成了能源，给生态环境带来了巨大压力。发展中国家的燃料有 90%来自于森林，造成森林资源的严重破坏。许多地区树木被砍光，植物秸秆被烧光，甚至牲畜粪便也用做燃料。据联合国粮农组织估算，在亚洲、非洲等地，每年作燃料烧掉的粪便大约有 4 亿 t，使农田肥力减退。全球目前以矿物燃料利用为主， 一方面缩短了其耗竭时间，另一方面释放出大量二氧化碳，引起温室效应和全球气候变化，危害地球生态系统的健康发展。

4) 对森林资源的压力。人口增加，人类需求也不断增加，为了满足其衣食住行的要求，人们不得不违背自然规律的制约，不断进行掠夺性开发，比如毁林造田、毁林建房、采伐木材等，使得越来越多的森林受到破坏。森林的大肆砍伐，破坏了生态平衡，引起水土流失、土地荒漠化、生物多样性减少等一系列问题。

5) 环境污染加剧。人口增加和经济发展，使污染物的总量增大。大量工农业废弃物和生活垃圾排放到环境中，影响了环境的纳污量以及对有毒、有害物质的降解能力，加剧了环境污染，从而进一步影响到人类的健康。

二、能 源 危 机

能源危机，主要是指石油、天然气、煤等矿物燃料的危机。随着全球人口的迅速增长和人均消费水平的提高，人类对能源的依赖性也更强了。然而，矿物燃料储量的有限性和世界能源利用持续上升趋势，使人们普遍意识到现有能源正面临着短期内枯竭的危险。因此，能源问题成为当今人类关注的焦点之一。

(一) 能源危机产生的主要原因

1. 矿物燃料的有限性

石油、天然气、煤炭等常规能源均属不可再生资源，储量是有限的，掠夺式的开发使其面临枯竭的潜在危险。随着人口增加和经济的快速发展，未来能源需求与消耗将猛增，能源供求形势不容乐观。据叶连俊(1980)估算，今后数十年内，有限的石油资源将被耗尽(表 19-9)。矿物燃料消耗量的持续增长将引发一系列经济问题和生态环境问题。

表 19-9　全球能源储量、耗量与寿命估计

能源名称	可采储量(标煤)/亿 t	消耗量占世界能源总量的百分数 /%	储量寿命 /a	潜在储量寿命 /a
石油	316	45	≤25~40	41
天然气	495	19	2000 年将耗掉现有储量的 73%	58
煤炭	101 260	25	≤30~190	150~250

引自刘静玲等编　2001

2. 世界能源消耗量急剧增加

世界能源的利用一直呈螺旋上升的趋势。比如现代人的寿命为其祖先的 1 倍，但每年消耗的能源却是其祖先的 9 倍，并且，现代人一年中的能源消费，要比其祖先在 100 万年中的消费还多。据统计，1900~1924 年全球能源消费增长了约 11 倍，1925~1990 年全球初级能源消费量平均以每年 30%的速度增长，20 世纪末能源使用量比 1900 年增长了 30 倍。今后随着人口增加，未来能源需求与消耗必将猛增。

3. 地理分布与实际消耗量不平衡

能源资源的地理分布极不均匀，煤炭主要分布在前苏联、美国和中国；石油主要分布在中东、前苏联、北美等地，从总体上看，北美处于有利地位，前苏联能源丰富,拉丁美洲处于一般地位，欧洲较差。但就实际消费情况看，占世界人口约 26%的发达国家消耗世界总能源的 77%，其中占世界人口 5%的美国，消耗世界能源的 25%。发展中国家能源消耗普遍较低，其中占世界人口 15%的印度，却只消耗世界能源的 1.5%。中国人均能耗不足世界人均能耗的 1/3。这种地理分布与实际消费量的反差和不平衡现象，一方面造成大多数发展中国家能源缺乏，工业落后，经济发展受到限制，从而不得不为了生存大量砍伐森林，加重了生态环境的破坏。另一方面少数发达国家又依赖现有的经济、军事优势，大量掠夺、浪费能源，从而使世界能源危机日益严重。

4. 世界能源消费结构不合理

在目前世界能源消耗结构中，煤炭占 30%、石油占 38%、天然气占 20%、水电占 7%、核电占 5%。石油、天然气、煤炭等常规能源均属不可再生资源，储量是非常有限的，面临枯竭的潜在危险。然而长期以来形成的传统能源结构已造成对常规能源的严重依赖，特别是对石油的依赖。因此，当石油资源锐减或欧佩克等石油输出国提高油价时，整个世界经济体系将发生巨大震荡，甚至导致经济危机。

(二) 缓解能源危机的对策

1. 节约能源，提高能效

开源与节流相结合，一方面加大能源勘探开发力度，积极寻求新能源。另一方面大

力推广节能技术和清洁能源生产技术，合理利用能源，减少能源浪费，提高能源利用效率。比如，改进汽车车型和发动机，减少耗油量。

2. 加快开发新能源

太阳能、水能、风能、地热能等新能源，具有清洁、可再生等显著优点，具有广阔的发展前景。加快新能源的研发不仅可以缓解常规能源不足问题，而且可以改善能源结构，提高环境质量。因此，新能源的开发利用是人类从根本上解决能源问题的关键所在，也是未来能源发展的方向所在。

3. 积极发展核电工业

从世界核电工业发展的情况看，法国、日本等国核电占全国电力的 70%，美国占 20%~30%，而我国不足 1%。今后，随着科学技术的发展，核能利用的安全性将进一步提高，核能还有很大的发展空间。核能的开发也将成为世界各国发展能源的潮流。

4. 重视国际间能源研究开发合作

能源危机已成为世界性问题，它关系着全球经济的发展。因此，对于新能源的开发和常规能源的技术成果应在全球范围内共享，发展中国家应借鉴发达国家的先进经验，引进最新技术，缩小差距，将能源浪费减少到最低程度。

（三）能源利用对生态环境的影响

不可再生能源在开采、运输、加工、利用等环节对生态环境有多方面的影响。

1. 城市大气污染

一次能源利用过程中，产生大量的 SO_x、NO_x、可悬浮颗粒物(TSP)及多种芳香烃化合物，对一些地区的城市造成了十分严重的污染。不仅导致生态破坏，而且损害人体健康。比如，欧洲共同体每年由于大气污染造成的材料破坏、农作物和森林以及人体健康损失费用超过 100 亿美元。我国每年因大气污染造成的损失达 120 亿元人民币。如果考虑一次能源开采、运输和加工过程中的不良影响，则造成的损失更为严重。

2. 增加了大气中二氧化碳的积聚

大气中二氧化碳的浓度为 280μg/g。由于矿物燃料的燃烧，目前大气中二氧化碳的浓度已达到 360 μg/g，预计 21 世纪中叶，其数量将达到 550 μg/g 以上，全球气温因此可能升高 1.5~4.5 ℃，海平面可能上升 10~40cm，将对全球社会经济产生严重影响。

3. 核废料问题

发展核能，尽管在反应堆方面已有了安全保障，但在世界范围内民用核能计划的实施，已产生了上千吨的核废料。这些核废料的最终处理问题并没有得到完全解决，在数百万年内仍将具有强辐射性。

三、食物短缺

食物是人类赖以生存和发展的一个基本条件，人类食物的供求状况是人类文明的主要标志。随着全球人口的迅速增加，人类对食物的需求量越来越大，而食物生产和消费的不平衡及生态环境的退化，使食物短缺问题日趋尖锐。

从人类食物的来源看，它主要来自于农田、温带草原和海洋，这是地球上生产食物的三大基地。农田主要提供植物性食品，草原和海洋主要提供动物性食品。地球作为人类的家园，究竟可以养活多少人口？据生态学家惠特克计算，地球的年初级生产量为 2.76×10^{18}kJ，处于能量金字塔顶端的人类只能利用其中的 1%，按每人每天需要摄入 9196J 这一全球平均标准计，能供养 82 亿左右人口。而目前全球人口已超过 60 亿，并且正以每天 22 万人、每年近 1 亿人的速度增长，到 21 世纪中期，全球人口将达到 94 亿左右。可见，未来世界粮食形势严峻，全球性的饥饿在所难免！

由于世界各国粮食消费量和占有量不均衡，部分发展中国家粮食严重短缺。目前，全球已有 1/3 的人口营养不良，5 亿多人口在挨饿。美国学者 Brown 依据当前世界粮食形势，对发展前景进行分析后认为，世界人口不断增加将成为 21 世纪困扰人类的首要问题，对未来世界的威胁将不是战争，而是比战争更可怕的世界性饥饿和对人类生存环境的破坏。

要解决粮食问题，必须首先严格控制人口，保持人口的适度不超过环境承载力阈值。否则，一切努力都将无济于事。其次，要依靠科技，大力开发海洋，积极发展生态农业，丰富食物来源，从根本上解决粮食问题。

四、资源衰减

资源问题指人类面临的矿产资源、水资源、土地资源、生物资源、森林资源等问题。由于人类对自然资源的过度开发和惊人浪费，目前其已经趋于枯竭。

（一）矿产资源衰减

矿产资源是在漫长的地质时期形成的储存于岩石圈中的宝藏，它是人类社会经济系统有效运转的基本物质条件。通常，一种重要矿产资源的发现与利用，往往能推动生产力的发展，同时也标志着人类社会的进步，甚至预示着一个新时代的到来。第二次世界大战结束以来，随着人口的急剧增长和经济的快速发展，全球各种矿产资源的开采量和消费量平均以每年 5%的速度增长。即每隔 15 年就要翻一番。今后对主要矿产资源的需求量和消费量，预计每年将增加 3%~5%。就世界主要矿产资源的储量寿命指数看，铝土矿是 224 年，铜矿是 41 年，铅、汞矿是 22 年，镍矿是 65 年，锡、锌矿是 21 年，铁矿是 167 年。可见，主要矿产资源不久即将枯竭。

（二）水资源短缺

水是生命之源，是生物地球化学过程的基本介质，人类生态系统的生命系统离不开水。随着社会的迅速发展和人类文明的不断提升，特别是人口的急剧增长，人类对水的依赖程度越来越高，全球耗水量急剧增加。现在人类每天提取的淡水量 $10km^3$，年均 $3500km^3$(约 2100 km^3 用于消耗)，同工业化初期相比增长了 35 倍，特别是近半个世纪淡水提取量以每年 4%~8%的速度递增，全球对水的需求量每 20 年翻一番，水越来越供不应求。与此同时，大量的污水被排放到江河湖泊等水体中，造成水体污染，进一步加剧了水资源紧缺的形势。污水的主要来源为：不断扩大的城市化造成的生活污水；工业生产过程中不断产生的废水；现代农业中大量使用化肥、农药造成的化学物质径流，引起水质恶化等。不仅使可利用水资源减少，而且还严重影响着生态系统的运行。目前全世界每年有 4.2 亿 km^3 污水排入江河，污染了 5.5 亿 km^3 淡水，约占全球径流量的 14%以上。

由于过量开采、惊人浪费、人为污染和水资源需求量日益增大，全球水资源短缺、水危机日益严重。据世界卫生组织估算，全世界约有 3/4 的农村人口和 1/5 的城市人口常年得不到足够的淡水，发展中国家 80%的疾病和 33%的死亡是因为饮用受污染的水造成的。水体污染、水质恶化，直接威胁着人类的生命，也影响着工农业生产。

（三）土地资源危机

土地是人类的家园，人类在自己的土地上创建了灿烂的人类文明，然而，随着文明的发展和人口快速增长，使土地的压力日趋严重。

1. 人均耕地下降

20 世纪 50 年代以来，随着人口的快速增长，以及非农业用地的不断增加，使得全球人均耕地面积日益减少，且减少速度相当迅速。1950 年全球人均耕地 $0.57hm^2$，到 1993 年减少到 $0.26hm^2$(表 19-10)。世界现有耕地 13.7 亿 hm^2，约占世界土地面积的 10.5%。据估计，到 2025 年，人均耕地将下降到 $0.17hm^2$，而人均耕地最少的亚洲，将从目前的 $0.14hm^2$ 下降到 $0.09hm^2$。

表 19-10　1950~1993 年世界人均耕地面积的变化

年份	1950	1960	1968	1974	1979	1991	1993
人均耕地 /hm^2	0.57	0.47	0.41	0.37	0.32	0.27	0.26

2. 土地退化

土地退化是指土地质量的降低，即土地生物生产力的降低。由于人口急剧增加和人均耕地面积不断缩小，为满足不断增加的粮食需求，人们不得不毁林开荒、围湖造田、增施化肥、农药等，对土地进行掠夺式经营，使土地资源日趋退化。20 世纪 80 年

代全球土地退化面积达 19.64 亿 hm^2，占全球总面积的 17%，其中中度退化的面积是 9.1 亿 hm^2，重度退化 2.96 亿 hm^2，极度退化 0.093 亿 hm^2。从退化面积看，亚洲土地退化位居榜首，高达 7.48 亿 hm^2，其次是非洲，为 4.94 亿 hm^2，再次是南美洲和欧洲，分别为 2.43 亿 hm^2 和 2.19 亿 hm^2。从土地的退化程度看，非洲和亚洲情况最为严重，在非洲，极度退化的土地达 0.052 亿 hm^2，重度退化的土地达 1.24 亿 hm^2。在亚洲，重度退化的土地达 1.08 亿 hm^2。土地退化的类型主要为：

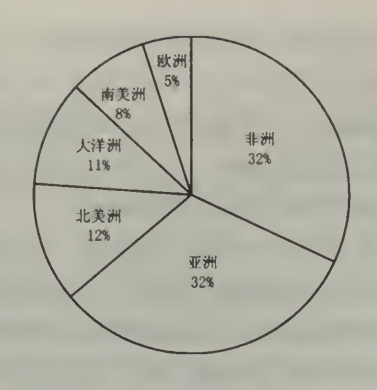
1) 水土流失。水土流失是以水为动力的土壤侵蚀现象，它是气候、地形、植被、土壤等自然因素和人类活动综合作用的结果。由于不合理的土地利用，比如砍伐森林、乱垦滥挖、过度放牧等，大大加剧了水土流失。全世界每年有 300 多万公顷土地毁于水土流失，流失土壤 270 亿 t。亚洲、非洲和南美洲，每公顷土地每年损失表土 30~40t，北美洲和欧洲每公顷土地每年损失表土 17t。中国是世界上水土流失最严重的国家之一。目前全国水土流失面积达 1.79 亿 hm^2，每年流失土壤总量达 50 亿 t。

2) 土地荒漠化。荒漠化是指包括气候变异和人类活动在内的种种因素造成的干旱、半干旱和半湿润半干旱地区的土地退化。它是在人为和自然双重因素的作用下导致的土地质量全面退化和有效经济用地数量减少的过程，其结果是生物生产力持续下降，粮食、牧草减产乃至绝收。

据联合国环境署 1992 年的现状调查，全球 100 多个国家和地区的约 10 亿人口受到荒漠化的危害，其中 1.35 亿人在短期内有失去土地的危险。并且荒漠化的土地以每年 600 万 hm^2 的速度扩展，造成的经济损失高达 423 亿美元。目前，全球荒漠化土地面积有 45.6 亿 hm^2，占世界陆地面积的 1/3。荒漠化受害面涉及世界各地(图 19-8)，但最为严重的是非洲、亚洲、拉丁美洲的一些地区，特别是从北纬 10°附近向东延伸到北纬 55°附近，即自北非的撒哈拉，经西南亚的阿拉伯半岛、伊朗、印度北部、中亚到中国西北和内蒙古，形成了一个几乎连续不断、东西长达 1.3 万 km 的辽阔干旱荒漠带，占世界沙漠面积的 67%。其中，亚洲的荒漠化土地面积最大，占全球荒漠化土地的 1/3 强。非洲大陆约有 1/5 的土地被沙化，比如在过去的 50 年中，非洲的撒哈拉以南有 6500 万 hm^2 变成沙漠，其中，75 万 hm^2 耕地被沙漠吞没，造成大批的“生态难民”。在南美洲，荒漠化已影响到 2.9 亿 hm^2 土地。在欧洲，希腊、西班牙等地中海沿岸国家，以及俄罗斯等国也面临荒漠化问题。中国是世界上受荒漠化危害最严重的国家之一。据统计，我国潜在荒漠化发生地区的总面积涉及 18 个省、471 个县，面积达 3.57 亿 hm^2，占国土面积的 37.2%。

此外，土地退化还表现在：① 土地次生盐渍化，它是人类不合理耕作和灌溉引起的。② 土地生产力下降，这是由于盲目提高复种指数，土地有机质得不到补充，土壤理化性质恶化而肥力下降。③ 土地污染，由于废水、废渣、农药、化肥进入土壤的数量增加而造成。④ 土地塌陷与裂缝，采矿业对土地造成的破坏。

土地是人类的家园，是农业生态系统的摇篮，人类的食物基地。保护土地资源的关键在于严格控制人口，合理进行土地利用规划，在利用土地时必须保护植被防止水土流失和荒漠化。同时，要提倡土地的集约化经营，科学管理土地，充分提高土地的利用效率和生产力。



19-8　世界各大洲荒漠化比例

(四) 植 被 破 坏

1. 森林面积急剧减少

森林是由乔木和灌木组成的绿色植物群体，它是地球陆地生态系统中最复杂的生态系统之一。据估计，全世界的森林覆盖面积约为 48.9 亿 hm^2，约占陆地面积的 1/3，为耕地面积的 3 倍多，其中近 50%位于热带。森林在各大洲和各国之间的分布不均，南美洲的森林面积最大，其次是北美洲。就国家而言，森林面积最大的是前苏联，最小的是巴巴多斯。

由于人口的增长和对森林的大肆砍伐和破坏，全球森林资源急剧减少。目前，世界上森林平均每年减少 1800 万~2000 万 hm^2。据联合国粮农组织的统计，自 1950 年以来，全世界森林已损失一半(主要是发展中国家)。其中减少最多的依次是中美洲(66%)、中非(52%)、东南亚(38%)。热带森林砍伐每年几乎达 1000 万 hm^2，森林砍伐率由 1976~1980 年的 0.6%增加到 1981~1990 年的 1.2%。全球森林每年消失近 1500km^2，以这样的速度递减下去，在今后 300 年内，全球森林将全部消失殆尽。

中国是一个少林的国家，但由于长期以来重伐轻育、管理不善，森林资源破坏严重。据统计，我国森林覆盖率现为 19.4%，与全球平均水平(31.4%)相差很大，世界排名第 120 位以后，人均林地面积 0.11hm^2，相当于世界人均的 15.96%，位居世界第 121 位，森林资源供需矛盾尖锐，森林保护与恢复任务艰巨。

2. 草场退化

草场包括草原、草地和草山草坡，是自然生态系统的一个重要组成部分。全世界草场面积约 30 亿 hm^2，占全球陆地面积的 22%。草场不仅具有巨大的生产力和经济价值，而且有重要的生态意义。然而不合理开垦与过度放牧，重用轻养，导致草场退化和丧失。目前，世界各地草场都有不同程度的退化，尤以发展中国家的草场退化最为严重。我国拥有各类天然草场 3.9 万 hm^2，约占国土面积的 40%，但人均草场 0.33hm^2，约为世界人均水平的 1/2。我国大部分草场已经或正在退化，其中，中度退化程度以上(包括沙化、碱化)的草场面积占可利用草场的 1/3，并呈继续扩展之势。

（五）生物多样性锐减

生物多样性是指在一定时间内，一定地区(或空间)的所有生物(植物、动物和微生物)物种及其变异和其生态系统组成的复杂性。它通常包括四个不同层次的多样性，即遗传多样性、物种多样性、生态系统多样性和景观多样性。

生物多样性是 34 亿年来自然界生物进化的结果，是宝贵的自然财富。正是依靠生物多样性，人类才得以产生、存在和发展。然而，由于人为的生态破坏、过度利用野生资源、不恰当的引种与外来物种入侵等，引起地球上生物多样性以空前的速度消失。自 1600 年以来已有 484 种动物和 654 种植物灭绝，而且物种多样性的损失的速度还在加快。据 1994 年世界保护监测中心(WCMC)估算，世界上至少有 5400 种动物和 26 000 种植物是受到威胁的物种。其中有 3956 个物种濒危，3647 个物种易危，7240 个物种珍稀。据估计，如果一个生境的面积减少 90%，大约一半的物种就会消失。若以目前的速度砍伐森林，则地球上全部物种的 1/4 在未来 20~30 年内可能有消失的危险。

五、全球环境变化

当代全球性的环境变化，主要是指除了普遍的大气污染、水体污染以外的温室效应和臭氧层破坏等问题。

（一）温室效应与全球气候变化

二氧化碳、甲烷、NO_x、CFC 等温室气体能够吸收地面长波辐射，并向外辐射，向下到达地面的长波辐射使地面损失的能量减少，从而起到保温作用，这种现象称为温室效应。在全球增温作用中以二氧化碳为主，约占 56%，CFC 占 24%，甲烷占 11%，氧化亚氮占 7%，水气占 3%。但甲烷、氧化亚氮、氟氯烃等温室气体的增温潜能远大于二氧化碳。19 世纪工业革命以来，越来越多的二氧化碳通过燃烧矿物燃料、从事农垦、砍伐并焚烧森林而进入大气，使大气中二氧化碳浓度逐步升高。从 19 世纪中期二氧化碳浓度由 265~290 μg/g 增加到目前的 360μg/g，与此相应的是从 19 世纪 80 年代到 20 世纪 40 年代，全球气温明显增高， 世界平均气温升高了 0.4~0.6℃。据科学家预测，按照目前的速率，到 2030~2050 年，大气中二氧化碳的含量将比工业革命之前增加 1 倍，达到 550 μg/g 以上，全球气温因此可能升高 1.5~4.5℃。

气候变暖的后果对人类来说是灾难性的。它会使全球降水量重新分配，冰川和冻土融化，海平面上升。据美国环保局研究，如果温室气体继续按目前的情况释放，估计到 2025 年海平面将升高 10~40cm，到 2100 年海平面将升高 60~200cm，那么，现在 30%~80%的沿海沼泽和许多地势低洼的岛屿可能被海水淹没。气候变暖还会引起气候带和自然带的变化，使亚热带向北扩展，北极地带的夏季明显变暖，作物的生长期大大延长。气候变暖还可能使不少地区的自然灾害增加。使半干旱的热带地方变得更加干旱，并加快土地荒漠化，使有些地区降雨量猛增而成涝灾。气候变暖还可引起气温急剧变化，使许多生物难以生存，加剧物种灭绝和病虫害的爆发。

为减少二氧化碳的排放，1992 年联合国环境与发展大会签署了《联合国气候变化框架公约》，其目的在于稳定二氧化碳等温室气体的浓度。减少二氧化碳排放的途径主要有改进能源结构，提高能源利用率，提高植被覆盖，制止乱砍森林，大力植树造林。

（二）臭氧层破坏

臭氧(O_3)是大气中的微量物质，主要分布在距地面 25~40km 的大气平流层中，称为臭氧层。臭氧层是地球的保护伞，它能阻挡太阳 99%的紫外线辐射，使地球生命免遭紫外线强烈辐射的伤害。自 1985 年英国科学家首次发现南极臭氧层出现空洞以来，有关研究表明，地球的臭氧层正日益遭到破坏，平流层臭氧浓度正在减少。国际臭氧趋势观察小组提供的 1978~1987 年高空飞行观察数据揭示，南纬 39°至南纬 60°臭氧减少 5%~10%，南纬 19°至北纬 19°近赤道地区减少 1.6%~2.1%，北纬 40°至北纬 64°减少 1.2%~1.4%，我国境内华南地区减少 3.1%，华北地区减少 1.7%，东北地区减少 3.0%。

由于大量的氟氯烃和哈龙等物质的排放，臭氧层日益稀薄，导致皮肤癌等疾病增多、农作物产量和质量下降、水体浮游生物生长受到破坏，并引起光化学烟雾污染。研究表明，平流层臭氧减少 1%，紫外线对地球表面的辐射将增加 2%，如按现在的速度计算，到 2075 年，臭氧将比 1985 年减少 40%，全球皮肤癌患者将达 1.5 亿人，白内障患者达 1800 万人，农作物将减产 7.5%，水产品减产 25%，人体的免疫功能也将减退，因此臭氧浓度的减少趋势及其严重后果已引起世界的极大关注。

臭氧层破坏的主要原因是人造化工制品氟氯烃和哈龙污染大气的结果。氟氯烃气体一经释放，就会逐渐上升到地球大气圈的臭氧层顶部。在那里，紫外线会把氟氯烃中的氯原子分解出来，产生破坏臭氧的连锁反应，导致平流层臭氧急剧损耗。其次，超音速飞机排出的氧化氮、农业上大量使用化肥产生的氧化氮、各种燃料燃烧产生的氧化氮等，都是破坏臭氧层的因素。此外，还有人认为核试验也是破坏臭氧层的因素。

保护臭氧层的最有效的办法是停止生产和使用氟氯烃和哈龙等人工物质，研制氟氯烃类物质的替代品，以用于冰箱和空调机中。目前，针对臭氧层的破坏问题，国际上开展了一系列的保护活动，1977 年通过《保护臭氧层行动世界计划》，并成立了国际臭氧层协调委员会。1985 年通过《保护臭氧层维也纳公约》，明确了保护臭氧层的原则。1996 年 9 月，23 个国家又协议通过了要求各国积极参加的《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》，对 5 种氟氯烃和 3 种哈龙的生产和消费作了限制规定。1996 年 1 月 1 日《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》开始执行，发达国家停止了氟氯烃工业化学品的生产，发展中国家要逐步淘汰，10 年后停止生产。

六、健 康 危 机

（一）发达国家的健康问题

在发达国家，引起死亡的主要原因是循环系统的疾病，尤其是心肌缺血病和脑血管

病，占死亡人数的 1/4。据统计，发达国家死亡人数和丧失劳动能力的人数的一半是由于心血管疾病造成的。癌症是第二大死亡原因，约占死亡人数的 20%。研究显示，癌症有取代心血管疾病而成为世界第一高死亡率疾病的趋势。肺癌和胃癌的致病因子多与环境和职业污染有联系，但吸烟则是引起肺癌的重要原因。此外，发达国家的人口还蒙受精神错乱和精神病的灾难。据世界卫生组织估计，严重的精神错乱影响着大约 2%的人口；另有 3%~8%的人口是由于不特别严重的问题致残的，比如与神经病和心脏病相关的酒精和毒品。如果考虑到隐藏的疾病在内，则问题的严重程度将显著提高。在很多发达国家，自杀是死亡的十大原因之一，且这种死亡人数正在持续上升。

（二）发展中国家的健康问题

在发展中国家，每年有 1100 万 5 岁以下儿童死亡，其中 50%~90%死于营养不良和传染病。据世界卫生组织估计，至少有 4.3 亿人受到营养不良的影响，有 1 亿 5 岁以下儿童忍受缺少蛋白质能量的营养不良，其中 10%以上的情况相当严重。贫血症影响着 2/3 的怀孕妇女、1/2 的未怀孕妇女，进而造成许多产妇的死亡。贫穷导致传染病和寄生虫病横行，非洲每年有 100 万 4 岁以下的儿童死于疟疾，发展中国家有 2 亿人口传染上血吸虫病。在发展中国家蔓延的另一类疾病是与空气传播有关的，比如肺结核是贫穷国家的主要公共健康问题。同时，贫穷的人们也同样遭受着发达国家的普通疾病。在发展中国家，16%的死亡是由心血管疾病引起的；癌症在一些国家正成为主要的公共健康问题，并将随着发展中国家增加卷烟消费而日益严重。此外，艾滋病正在全世界疯狂地蔓延，据世界卫生组织估计，目前，世界上艾滋病病毒感染的人已超过 1700 万，并以每天 1 万人的速度增加。艾滋病已成为危害人类健康的又一大隐患。

总之，面对工业化带来的种种始料不及的恶果，人类已清醒地意识到现存的生态危机是由于人类不合理的决策和失误造成的。正如恩格斯指出的：“我们不要过分陶醉于我们对自然界的胜利，对于每一次这样的胜利，自然界都报复了我们。”生态危机，人与自然的关系紧张，使人类清醒地认识到曾引以为豪的工业文明已经走到了历史的尽头。在生态危机成为人类发展生死攸关的问题的时候，我们必须重新审视人与自然的关系，建立一种新的人与自然和谐相处、协调发展的生态观。

第六节　生态伦理建设

一、生态伦理学的产生与发展

生态伦理学(ecological ethics)是关于人与自然关系的道德研究，是关于人类对待地球上生物、生态系统和自然界其他事物的行为道德态度和行为规范的研究(余谋昌 1995)。生态伦理学属于哲学的研究范畴，它以生态道德为对象，利用生态学原理研究人与生态环境之间的辨证统一关系，以及人类在利用生态环境时的道德准则。生态伦理学对目前全球生态系统中出现的生态危机和道德问题加以理论概括和哲学探讨，研究生

态意识的产生发展规律及其特征，阐明生态道德的构成及其价值。它倡导一种热爱大自然、与自然和谐共进的伦理思想，倡导生态善恶观、生态良心、生态正义和生态义务的道德行为规范。

生态伦理学早在人类远古时期——图腾文化阶段就开始萌芽，但作为一门科学最初是由法国哲学家 Schweitzer 和英国生态学家 Leopold 分别在 20 世纪 40 年代和 50 年代提出来的。施韦兹认为“尊重生命是伦理学的最有效的基础”，利奥波德在《大地伦理学》中极力主张“人类必须从新审视和确立自身在自然界的地位，人类只不过是自然界的一个成员和公民，不能以征服者的姿态出现于自然界”，这意味着人类应当尊重他的生物同伴，并以同样的态度尊重大地社会。但当时这种观点并没有引起社会的重视。直到 20 世纪 70~80 年代，随着全球生态危机的出现和日益严重，西方学术界兴起了对生态伦理学的讨论，使人们意识到先驱者的研究工作已使科学意识产生了某种飞跃。随着国际交流研究的加强，大大促进了生态伦理学的发展。特别是可持续发展观的提出，使生态伦理学有了更为深刻的内涵。生态伦理学的发展，对于规范人们的道德行为，改变传统发展模式和消费模式，具有重要的指导意义和巨大的推动作用。

二、生态伦理学的基本思想与特征

（一）生态伦理学的基本思想

生态伦理学，也称生态哲学，它是一门新的伦理学科，它超越了传统伦理学观念的束缚，把道德对象和行为规范从人际关系扩展到整个生物圈和整个地球生态系统。它从生态道德关系的角度承担协调人与自然关系的任务。以往的哲学或伦理学主要是关于人类社会的哲学或伦理学，而关于自然界的生态哲学或伦理学几乎是空白。生态伦理学提倡对自然生态系统、对动植物物种的关注，并以人与自然协同进化作为该学科的出发点和最终目的。因此，需要把价值、权利和利益的概念扩大到非人类的自然界及其过程， 不但要承认人的价值、权利和利益，而且也要承认自然界的内在价值、权利和利益，也即在人与自然的生存和发展层次上，承认自然与人类的平等关系，以及承认当代人与后代人在共享基本生态资源方面的平等关系。这就需要引入一系列新的伦理范畴，比如生态意识、生态道德、生态利益和生态价值等。

生态伦理学实质上改变了以往哲学和伦理学只关心人类，只对人类尽义务和责任的状况。作为与社会伦理学既相联系又相区别的独立学科，把动物、植物和自然界以及未来人类纳入道德考虑的范畴，提出对他们共同尽义务和责任的问题。正如利奥波德所指出的“在人类历史上，我们已经懂得(我希望懂得)，征服者的任务最终是征服自己。”人类的过去、现在和未来永远都是自然界不可分割的部分，尽管人类创造了高度发达的技术及其人造设施，但这并不意味着背离自然而去，可以脱离自然，相反，人类之根正在越来越深地植入自然之中。因此，生态伦理学的创立，可以说是一场哲学观念的革命。

(二) 生态伦理学的特征

生态伦理学对人类社会的调节作用，在人与自然关系上，表现为生态道德对人与自然、人与生态环境之间的调节作用。生态伦理学规范人类对待自然、对待生态环境的行为与义务，树立尊重自然、善待自然、关心地球家园和人类命运，自觉参与保护生态环境的社会道德。

生态道德的提出与人的价值观取向转变有关。人类生活的地球上主要有两种可供自己处置的财产，一是人类的智慧，一是全球生态环境。但以往人类在利用自己的财产时，并未意识到全球生态环境的巨大生态价值。而是一味地对其进行掠夺，结果不仅侵犯了自然界其他成员的利益，同时也损害了自身的利益，这种损人不利己的行为显然是不道德的。因为任何生态环境资源都是有价值的，它是人类共有的“固定资产”。因此，人类应当珍惜、保护与合理利用生态环境这一大自然赋予人类的宝贵财富。确立了生态道德，便可规范人类对待生态环境的态度和行为，同时也决定了生态伦理学在保护生态环境中的实际意义。

(三) 生态伦理学的价值取向

1) 考虑人的社会需求和有机体的目的。考虑人的社会需求和有机体的目的，“需求”的平衡，不仅涉及人与人的关系，也涉及人与有机体、有机体之间与生态环境的关系。即尊重生命社会，同时也要改善人类生活质量。遵循人类的生存利益高于其他物种的非生存利益，其他物种生存利益高于人类的非生存利益的原则。

2) 保护地球有机体的活力和多样性。保护生命支持系统，保护生物多样性，保持永续地利用可再生资源。

3) 最低限度的耗用不可再生资源。

4) 考虑人与物种的关系，保护物种的存在。要考虑人与物种的关系，保护物种的存在，要求人们对人类-大地-物种的三角关系进行整体综合考虑。遵循“物种与其栖息地同等重要，物种质的价值高于个体量的价值”的原则。同时，要考虑人与生物群落的关系，遵循“一切事情有助于保持生物群落的完整、稳定和美丽时，它就是正确的，否则就是错误的”原则。

5) 考虑当代人和后代人的关系。要考虑当代人和后代人的关系，把人类的近期利益扩展到长远利益，对当代人与后代人在最基本的生存需求、社会需求方面做出平衡。遵循“当代人的利益与后代人的利益同等重要”的原则。

6) 保持人与自然协同进化。在人类历史上，从来没有像今天这样迫切地需要在国际生态环境治理方面开展全球合作，从来没有像今天这样提倡珍惜生命、保护地球。人类面临着双重任务。即在关心、保护人类的整体长远利益的同时，也必须对其他生物和整个地球生态系统的健康和完善竭尽义务和责任。

三、生态道德建设

（一）道德与生态环境的关系

道德(morality)是社会意识形态，它是社会存在的反映。人类与自然的关系作为重要的社会存在，必然反映在道德这一社会意识中。生态破坏和环境污染的严重形势促使新的道德规范形成，出现了新的生态道德和生态文明。这些保护生态环境的道德规范又作为一种社会调节功能对保护生态环境起到了重要的反作用。

在生态环境日趋严峻的形势下，人类开始冷静地思考自己在自然界的地位，重新审视人与自然环境的关系，衡量自己对自然界的作用和行为，深刻感受到人类对生态环境的道德责任。从人类中心主义，到以泰勒为代表的生物中心主义，再到以利奥波德为代表的生态整体主义，人类的道德认识逐渐扩展。从只关心人类，只对人类尽义务和责任的传统道德，发展到对生态系统的所有成员尽义务和责任的生态道德，这是人类道德认识的一次革命。

（二）生态道德的概念、内容和目标

1) 生态道德的概念。生态道德(ecological morality)是指以生态学关于人与自然的相互作用、相互依存和共同发展为依据，以调整人与自然的关系为手段，以培养人类的生态环境意识，激发人们保护生态环境的道德责任为内容，以实现人与自然协调发展和生态平衡为目的的生态行为规范。

2) 生态道德的内容。生态道德的主要内容包括：保护生态环境，防止破坏和污染行为；保护生物栖息地，禁止毁坏生物生境的行为；保护森林和草地，严禁滥砍乱伐、过度放牧等破坏植被的行为；保护一切珍稀、濒危动植物，严禁滥采乱杀野生动植物的行为；维护生态平衡，禁止破坏生态平衡的行为；维护生态系统的整体性，禁止破坏生态系统整体性的行为；维护生态系统的功能过程，包括物质循环和能量流动，禁止损害生态系统功能机制的行为；维护生物多样性，禁止破坏生物多样性的行为；保护、合理开发利用自然资源，禁止掠夺破坏自然资源，保证自然与社会的可持续发展等。

3) 生态道德的目标。生态道德的目标主要是保护地球上人与生物的生存条件，保护地球上基本生态过程和生命维持系统，保持生物多样性等，从而保证人类对生态系统和自然资源的持续利用，保证自然-经济-社会生态系统的可持续发展。

（三）生态道德的构成

1) 生态善恶观。善与恶是道德规范的一个重要衡量尺度。当善与恶、美与丑的原则融入生态学内容时，就有了新的诠释与层次。生态善恶观的确立，正是对善恶观的生态学诠释，它有助于人们以大自然的真善美为真善美，并为维持这样的真善美而行动。热爱大自然，对大自然美的深刻感受和认识，正是形成生态道德的基础。

2) 生态良心。良心是伦理学的一个重要范畴，它不仅包括人们对社会、对他人的责任感，也包括人们自身的责任感、同情感、耻辱感等道德感情。生态良心的道德意识脱离了社会和人际关系的小圈子而扩大到了整个生物圈。这样，生态良心就包括了人们对生态环境、对大自然中所有生物的责任感及同情感。因此，人类便自觉地维护生态环境，维护生物圈的生物多样性。

3) 生态正义。生态正义是指个人或社会集团的行为符合生态平衡原理，符合生物多样性的原则，符合全人类保护生态环境的愿望和全球意识，符合“只有一个地球”的全球共同利益，特别是符合为子孙万代保护生态环境的可持续发展观。反之，违背生态规律，对自然资源进行掠夺式开发利用，导致生态环境恶化的行为；肆意消耗自然资源、造成全球生态环境危机的行为；把污染转嫁到公海或发展中国家，搞污染输出的行为；任意捕杀珍稀动物、毁灭物种，造成生物多样性减少的行为；以及发动战争，造成生态破坏和生态难民的行为等，都是非正义的。

4) 生态义务。义务是伦理学范畴的一个重要概念，它是从人们的社会生活以及社会关系中引申出来的。比如人是国家的一员，就应该对国家尽义务；人是家庭的一员，就应该对家庭尽义务。人之所以要尽义务，是因为人与他所依存的社会、国家、家庭的命运息息相关。同样，人类是地球生态系统的一员，地球生态环境的命运与人类息息相关，这就决定了人类的生态义务。生态伦理学强调人与自然协同进化，明确了人类对整个生物圈和地球环境应尽的义务。每一个物种都是生物圈的结构和功能单位，这也就决定了人类应该为维护这种结构和功能的完整性尽义务。随着生态意识逐步的深入人心，生态义务必定会成为人类新的道德规范。

（四）生态道德的基本原则和标准

1. 生态道德的基本原则

1) 根本需求原则。在权衡人与自然利益的先后秩序上应遵循生存需求高于基本需求、基本需求高于非基本需求的原则。在人与人之间是如此，在人与生物之间、人与生态环境之间同样也是如此。当人与生物的利益发生矛盾时，人类的生存需求高于生物的生存需求，生物的生存需求高于人类的非生存(奢侈)需求，否则就是不道德的。在人类非生存需求与生物的生存需求发生矛盾时(比如人类为了娱乐、美食杀死野生动物)，人类的非生存需求应当为生物的生存需求让步。

2) 亲近原则。当人类与其他生物的利益发生冲突时，应以人类的利益为优先。当人类必须做出选择时，应以与人类关系亲近者的利益具有优先性。奈斯曾说“如果要在踩踏矮柳和美丽、稀有的雪龙胆之间做出选择，那么，我会毫不犹豫地踩踏前者”。

3) 整体利益高于局部利益原则。对于生物物种而言，物种的需求高于个体的利益。对于生态系统而言，所有生物物种的活动都应服从生态系统的需求。通俗地讲，当一个事物有助于保护生物共同体的和谐、稳定和持续发展时，它就是正确的，反之就是错误的。

4) 人与自然和谐相处原则。人类作为地球生物圈的一员，与其周围环境之间紧密

联系、相互作用，共同构成一个生机勃勃、气象万千的人类生态系统。无论是在能量流动还是在物质循环的系统运行中，具有“万物之灵”美称的人类居于占支配地位的生态金字塔的顶端。所以，人类不仅可以作为被动的消费者在系统中生存，同时还可以作为主动的生产者能动地建设与改造生态系统。但人类对自然资源的开发利用不能超过生态环境承载能力，即要遵循生态规律和经济规律，处理好环境与发展的关系，作到人与自然和谐共处、协调发展。

5) 可持续发展原则。可持续发展原则强调发展必须限定在生态系统可以支持的范围内，发展不能以过度消耗资源和牺牲环境为代价，不应损害支持地球生命的自然生态系统。自人类出现以来，自然界就在人类的控制下，逐渐变成为人工化的自然生态系统。随着人类对环境的不断征服和改造，使人类作为征服者的自豪感不断增强。但是缺乏生态意识、超越自然规律，对自然界的疯狂掠夺，最终使人类面临严重的生态危机。人与自然的矛盾空前尖锐，使人类认识到传统的发展模式不可持续，是造成生态危机的根源。经过认真的反思，人类选择了可持续发展的生存模式。

2. 生态道德标准

依据上述原则，可得出评价人类行为的两条基本道德标准：

1) 维持生物多样性。人类对待生物的行为以保护生物多样性、维持物种的存在为标准，危害物种生存的行为是不道德的，比如人为消灭某些对人类有害的物种、大肆砍伐森林、过度捕捞等。

2) 维护生态系统整体性。人类对待生态系统的行为以维护基本生态过程，保护生物圈稳态机制，维持生态系统的整体性为标准。为此，人类有责任和义务完善生态系统，保护和增强生态系统维持生命的能力，任何破坏和损害生物圈整体性和生产力的行为都是不道德的。

（五）生态道德规范

1. 热爱自然、尊重自然

这是最基本的生态道德规范。人类作为自然界的一员，不可能超越自然而存在。人与自然是一种平等的关系，而不是征服与被征服的关系。无论自然对人类目前的价值如何，都应受到热爱和尊重。人类对待自然界的态度，不仅关系到自然界的整体平衡，也是判断人类道德水平高低的重要依据。人类只有摈弃过去那种人类中心主义的伦理道德观，重新确立新的人与自然和谐相处、协调发展的生态伦理道德观，真正把自己视为自然界的一部分，才可能保证生态系统的平衡。

热爱自然、尊重自然的道德规范，要求每一个“地球村公民”不伤害、不损害自然发展的过程；不危及地球上所有形式的生命，并能够保证其持续生存和发展，尤其是珍稀动植物的生存与发展；在利用自然资源从事生产时，不能对与其共存的其他系统或物种的完整性构成威胁，保证不因战争或其他行为造成自然的退化。

2. 合理利用自然与保护生态环境相结合

在开发利用可再生资源时，做到消耗、使用和培植、养育相结合，以保证其生生不息，持续地为人类服务。 在开发利用不可再生资源时，必须采取相应的科学技术手段和合理的综合保护措施，防止对生态环境构成破坏或污染。坚决制止掠夺性利用、破坏性开采自然资源的不道德行为。

3. 局部利益和整体利益、眼前利益和长远利益相结合

只要人类社会存在，人们对利益的追求就不会停止，但是个人、单位、民族和国家追求物质利益所带来的价值观念和采取的方法不同，开发和利用自然的方式不同。目前的生态危机，就是人们没有处理好局部利益和整体利益、眼前利益和长远利益的关系所致。因此要处理好它们之间的关系，实现生态系统正常运行和社会可持续发展。

4. 权利和义务相一致

每个人都是地球生命大家庭的一员，人人都有生存发展的权利。每个人在享受大自然的同时，也有义务爱护大自然，保护大自然。这种权利和义务相一致的生态道德规范，落实到生态环境保护上，就是国际公约中的“污染者负担”原则，即污染和破坏生态环境造成的损失由排放污染物和造成破坏的组织或个人承担。在中国则具体落实为“谁开发谁保护、谁破坏谁恢复、谁使用谁付费、谁污染谁治理”的管理制度。

（六）生态道德行为对策

很多生态问题的产生，是由于人类出于各种目的，无组织、无纪律行为造成的。比如滥伐森林、滥捕野生生物、乱垦草地和湿地、围湖造田、盲目追求高消费等。这些行为分布面广、管理难度大、危害和不良影响也大。对于这些不良行为，必须通过国家的法律、政策和管理予以彻底扭转。对全体公民来说，从我作起，自觉保护生态环境，这是实现生态环境良性发展的重要条件。

1. 加强生态道德教育、提高生态道德意识

保护生态环境必须加强全体公民的生态道德教育，培养生态道德意识，提高生态素质。彻底改变“以人为中心”的价值取向，遵循人与环境和谐相处的原则，不断提高保护生态环境的自觉性，养成良好的生态道德习惯和生态文化传统。

2. 由传统消费向绿色消费转变

绿色消费是人类消费方式的大变革，它是倡导勤俭节约、不浪费资源，对生态环境不造成污染的新的生活方式和娱乐方式。绿色消费包括两方面的内涵：

1）倡导以提高生活质量为中心的适度消费。在满足人类随生产发展而日益提高的基本需求的前提下，追求物质上节俭、精神上丰富的节俭型生活方式。生活质量的提高不以奢侈、豪华为目标，而是追求需求的多样化，商品和服务种类、质量的多样化。

2）崇尚绿色产品的生产和消费，提倡购买生态标志产品。绿色产品是对人体和生态环境均无公害并符合生态环境保护要求的洁净、安全产品。生态标志产品是对绿色产品的商业标志。购买生态标志产品可以促进绿色消费浪潮的兴起，促使企业实行绿色生产，减少资源浪费，防止生态破坏和环境污染。

3. 控制生活垃圾，减少白色污染

控制生活垃圾，要从每一个消费者做起，尽量减少垃圾产生量。可采取清洁生产、回收利用、收费制约、绿色交换等措施控制垃圾排放量。比如我国针对白色污染日趋严重的状况，启动替代产品，淘汰一次性发泡塑料餐具和超薄塑料袋生产，并将出台一次性餐具和一次性塑料购物袋的环保控制标准，这些具体措施的执行，离不开广大消费者的积极响应和自觉行动。

4. 珍惜野生动植物，保护生物多样性

大肆砍伐森林、捕杀野生动物、破坏生物栖息地，是造成物种灭绝、生物多样性减少的主要原因。因此，珍惜野生动植物，保护生物多样性的当务之急是要加强自然保护区建设，实施天然林保护计划，加大执法力度，打击非法盗猎、砍伐等行为。

5. 拯救地球，从我做起

可持续发展目标的实现、生态环境的良性发展，需要全人类的共同努力。只有一个地球，作为地球村的每一位公民，都应从我做起，积极参与拯救地球的行动。通过植树造林种草、减少垃圾排放、推行清洁生产、发展生态产业、改变生活模式等自觉行动，保护和改善生态环境，促进人与自然的持续、稳定和协调发展。

四、生 态 教 育

（一）生态教育的由来

生态教育，也称环境教育或绿色教育。它是以人类与生态环境的关系为核心而开展的多种教育活动。生态意识和生态道德的形成，依赖于生态教育体系的建立和生态教育的全面开展。

生态教育出现在20世纪60年代末期。当时在一系列生态环境问题的震撼下，从发达国家开始，人们逐渐认识到生态环境问题不是一个单纯的自然问题，而是一个包含自然和社会因素在内的复杂的系统问题。解决生态环境问题要求人们对生态环境问题有科学的认识，这一方面需要开展多方位、多学科的综合研究，培养专门人才；另一方面更重要的是要普及生态学和环境科学知识，使公众理解人与自然的关系，唤起人们的生态环境保护意识，形成自觉保护生态环境的社会风尚。正如世界银行在1992年所指出的“改善信息和环境教育，最重要的作用在于改变人们的行为”。保护生态环境，固然可以借助法律这一有力武器，但法律只能约束人们不去危害生态环境，而不能促使人们去主动采取对生态环境有利的措施。可以说，如果没有公众的参与，几乎没有哪一个政府

能取得对生态环境管理的成功。何况政府官员本身也有一个接受生态学和环境科学知识的问题。

1970 年美国颁布《环境教育法》，率先提出生态教育的概念。1972 年斯德哥尔摩人类环境会议之后，联合国教科文组织和联合国环境规划署经过几年调查和准备，于 1975 年正式制定并开始实施国际生态教育计划。同年联合国环境规划署在贝尔格莱德召开了国际生态教育专家讨论会，并发表了具有历史意义的《贝尔格莱德宪章》，指出为了能够察觉生态环境及其有关问题，人们不但要关心它，而且要着手解决它，并对可能出现的新问题，防患于未然。作为个人和团体，必须具备与此相关的各种知识和技能、态度和观念等。1977 年，联合国教科文组织和环境规划署在第比利斯召开了政府间的生态教育会议，并发表了著名的《第比利斯宣言》，强调在进行生态教育时，要特别重视生态道德和生态价值观的影响和作用。《贝尔格莱德宪章》和《第比利斯宣言》的发表，极大地推动了国际生态教育的普及，80 年代，生态教育在全球兴起并得到蓬勃发展，生态教育已渗透到各个专业和各种人群中。1992 年联合国环境与发展大会将生态教育正式列入《21 世纪议程》，把生态教育提到了相当高的程度，并把教育的重点放在普及性生态教育上。生态教育的兴起，体现了现代教育发展的一个新趋势——教育绿色化。

（二）生态教育的目的

生态教育的目的是借助于教育手段，普及生态环境知识，提高人们的生态环境保护意识，使整个社会对人类与生态环境的关系有一个新的、正确的认识和态度，使人们了解生态环境问题的复杂性与紧迫性，激发人们关心、爱护生态环境的积极性和自觉性，增强对生态环境问题的责任感和紧迫感，培养一批保护环境、治理污染、改善生态所需要的各类专业人才。简言之，生态教育是全民教育、终生教育和可持续教育，它着眼于提高全体公民的生态环境意识，培养具有可持续发展潜质的人才。

（三）生态教育的途径

1. 决策生态教育

决策生态教育是对决策人员进行的生态教育，其是生态教育的核心。在一定程度上，公众生态意识的强弱取决于决策人员生态意识的高低。决策人员生态意识和决策水平直接决定着工程建设项目的最终利害关系以及该项目对生态环境产生的影响大小。生态决策科学，可取得良好的社会效益、经济效益和生态效益。反之，生态决策失误，将会带来难以估量的不良生态环境后果，从而无形中给生态环境保护工作增加难度。决策生态教育的对象是各级政府以及企业、事业单位的领导人员，其内容以生态环境问题的宏观规律为主，它的目标以培养各级领导人员的生态意识、全球意识、忧患意识和生存意识为主。

2. 学校生态教育

学校生态教育可分为生态普及教育和生态专业教育两类。生态普及教育是指在各级各类学校中非生态专业中开展的生态教育。中小学阶段是一个人成长和发展的关键时期，在中小学开展生态教育，具有潜移默化滞后生效的作用。生态教育的具体任务和具体内容，在不同年龄段是不同的。中小学和幼儿园开展生态教育的根本目的是逐渐培养和提高其生态意识。幼儿和小学低年级学生主要的培养学生了解和认识生态环境的兴趣。小学高年级和初中学生除了培养兴趣，还要使他们了解生态学和环境科学的基本知识，学会从各方面获取生态环境保护的信息。高中学生除了培养其对生态学和环境科学的兴趣和获取相关信息的能力外，还要树立正确的生态道德观念和价值观念，掌握必要的生态环境保护技能，积极参与生态环境保护的社会实践活动。中小学生态教育的方式主要是按照国家教育部制定的各种教学大纲和教材，强调将生态学和环境科学知识有机地、灵活地渗透到相关学科的教学中。此外，还要因地制宜地开展形式多样、生动活泼的课外活动和社会实践活动。

在普通高等院校非生态专业开展生态环境普及教育，可采用开设跨系选修课、专题讲座等形式进行。其教学内容和方法，应有利于各专业课。在保证课程的科学性、系统性的基础上，注意学科知识的广博。在教学方法上要富有启发性、力求生动活泼。精选教学内容，不追求个别内容最佳，而要求整体的最优结合。

专业生态教育是为培养生态环境保护方面的专门人才而设置的。我国现已形成从中等专业学校到博士后流动站各个层次的各种生态、环境类专业，培养了大批生态环境保护专业毕业生，为生态环境保护输送了大批专业人才。今后，随着我国生态环境建设的加强，还需要大力发展专业生态教育。

3. 公众生态教育

公众生态教育即全民生态教育，是普及生态环境保护知识的关键所在。没有全民的参与，保护生态环境就是一句空话；没有全民的良好的生态意识，保护好生态环境也是不可能的。公众生态教育的主要方式是通过广播、电视报刊等宣传媒介以及开展环境日、 环境月等生态环境保护活动，大力宣传生态环境保护知识。公众生态意识的高低是衡量一个国家或地区生态环境保护工作好坏的重要标志。比如日本是一个地震、火山频繁发生的国家，但因此造成的生态环境损失却很少。这主要归功于其公众的防震意识比较强，而且每逢防震日，日本都要举行大规模的防震演练，向全体公民宣传防震减灾知识，提高人们的生态意识。

第七节　人类生态系统的可持续发展

一、人类生态系统的发展过程

从生态学的角度分析，可将人类生态系统的发展过程划分为四个阶段。

(一) 原始生态阶段(距今 5 万~1.2 万年前)

这是人类生态历史中最长的阶段，这一阶段人类生态系统与自然生态系统没有多少区别。人类与杂食性哺乳动物之间的区别只是人会使用简单的工具，并开始学会使用火，它揭开了人类利用体外能的序幕。从人与自然的关系看，人口的变动对生态环境的影响微乎其微，而生态环境对人口的制约则是这种关系的主要方面。在当时的生态系统中， 人类只是普通的一员，以狩猎为生，人口动态受生态规律的调节，这种格局在整个漫长的原始生态阶段没有本质变化。人与生态环境关系变化缓慢的原因是人口密度低、群体小、劳动力少，不可能出现劳动分工，人类的力量还不可能克服生态环境的约束，更谈不到改造生态环境。

(二) 早期农牧生态阶段(距今 1.2 万~6000 年前)

大约在 1.2 万年前，当人口增长超出自然生态系统所能承受的数量时，需求的压力迫使原始农业的产生，人口的密度与交流接触的频度成正比，由于人口增加，接触频繁，物质得到交流，人类开始了初步的分工。植物的栽培和动物的驯化，使人类有了稳定的食物供应，减少了游牧、开始了定居生活，也开始了改造地球的过程。随着农牧业的发展和科学技术的进步，人类发明了风车、水磨、帆船，扩大了体外能的使用范围，大大加强了人类社会对生态系统的冲击强度。可以说，农业的起源实质上是人类完成了从依赖自然生态系统到建立由自己控制的人类生态系统的划时代的转变。人类从生态系统的一般成员，转变成为生态系统的中心，成为生物圈的主人和调控者。

(三) 早期城市生态阶段(距今 6000 年~1860 年)

大约在 6000 年前，在美索不达米亚出现了人口集中的居住地，即城市的雏形。不久在世界其他地方也相继出现了早期的城市。人口聚集的城市化过程，把人类历史导入了一个新的生态阶段，使生态系统的物质循环发生了多方面的变化。

随着人口密度的增加、工具的改进，人类改造自然的欲望越来越强烈，出现了不合理的开发，人与自然的和谐关系变得难以维系，突出表现在森林面积不断减少、自然植被退化、水土流失、土地肥力下降等方面，自然开始惩罚它的“主人”——人类。比如最早的人类文明——巴比伦文明，它发生在底格里斯河和幼发拉底河平原下游，即美索不达米亚，现今的伊拉克。早在 12 000 年前这里就开始了农业生产，到新石器时代，这里的土壤、植被、生物群落已经发生明显的变化。公元前 3500 年当地农业发展到了鼎盛时期，但 1000 年后，土地受到盐渍化的严重威胁，自然生态环境的进一步恶化，灿烂的巴比伦文明因再也无法维系下去而由此陨落了。

(四) 现代工业生态阶段(公元 1860 年以后至今)

19 世纪工业革命以后，在科技进步的推动下，人类社会发展进入了一个全新的生态阶段。当今世界人口增长速度越来越快，人类的需求越来越高，对生态环境的压力越来越大，人类面临五大生态危机的挑战。因而，协调人与环境的关系，维持人类生态系统的持续发展，是全人类的共同任务。

二、可持续人类生态体系建设

可持续发展是指既满足当代人的需求，又不对后代人满足其自身需求的能力构成危害的发展。它是在资源和环境所能承载的前提下，人口、经济、社会的协调、健康发展，即做到经济可持续、社会可持续和生态可持续。可持续发展思想的产生和形成过程，有着深刻的生态背景。正如美国生态学家 Forman 所言：可持续发展是寻找一种最佳的生态系统和土地利用的空间来支持生态的完整性和人类愿望的实现，使环境的持续性达到最大。

(一) 人类生态系统可持续发展的内涵

可持续意味着正常发挥功能、不断优化结构。人类生态系统可持续发展是指系统良性运作，既可为当代人提供足够的生产生活资源，又可为子孙后代提供所需的生产生活资源；既为当代人提供适宜的生态环境，又不威胁子孙后代的生存空间，使退化的系统恢复到良好的状态，使良性的系统不断进化、完善，发挥其最大功能，为人类服务。人类生态系统的可持续发展意味着系统是稳定的和健康的，在时间上可以维持它的结构和自治，也能够维持对胁迫的恢复力。地球是人类生态系统可持续发展的前提，而人类生态系统的可持续发展则是人类社会可持续发展的重要前提。

(二) 人类生态系统可持续发展遵循的基本规律

1) 相互依存与制约规律；
2) 物质循环与转化规律；
3) 物质输入和输出的动态平衡规律；
4) 协同进化规律。
5) 最大阈限规律；
(这一部分详见第十八章)

(三) 人类生态系统可持续发展的评价

人类生态系统研究的核心问题是人类生态系统的可持续发展。不同学者从不同的研

究角度出发，提出了人类生态系统可持续发展的不同衡量指标。下面简要介绍两个具有代表性的人类生态系统可持续发展的衡量指标。

1. 从5个基本要素出发来衡量人类生态系统可持续性

牛文元(1997)等认为人类生态系统可持续发展的指标，可由以下 5 个基本要素及其复杂关系来衡量。

1) 资源的承载能力。通常称为“生存支持系统”或“基础支持系统”，它是指一个国家或地区人类生态系统的人均资源占有数量和质量，以及对于该空间内人口的基本生存和发展的支撑能力。如果可以满足(不仅考虑当代，还要考虑后代)，则具备了可持续发展的条件；如果不能满足，要依靠科技进步挖掘可替代资源，务求“生存支持系统”保持在区域人口需求的范围之内。

2) 区域人类生态系统的生产能力。通常称为“发展支持系统”或“福利支持系统”，它是指一个国家或地区在资源、人力、技术和资本的总体水平上，可以转化为产品和服务的能力。可持续发展要求生产能力在不危及其他子系统的前提下，应当与人的需求同步增长。

3) 环境的缓冲能力。通常称为“环境支持系统”或“容量支持系统”，它是指人类对区域的开发、资源的利用、经济的发展、废物的利用等，均应维持在环境的允许容量范围之内，否则，它将成为限制发展的瓶颈之一，可持续发展将不可能。

4) 社会发展的稳定性。通常称为“社会支持系统”或“过程支持系统”，它是指在整个发展的轨迹上，不希望出现由于自然波动(特大自然灾害与不可抗拒的外力干扰)和社会经济发展波动(由于战争干扰、重大决策失误所引起的不可挽回的损失等)所带来的灾难性后果。这里有两条途径可以选择：其一，培植系统的抗干扰能力；其二，增加系统的弹性，一旦受到干扰后应具有强的恢复和重建能力。

5) 管理的调节能力。通常称为“智力支持系统”，它要求人的认识能力、判断能力、决策能力和调节能力，适应总体发展水平。即人的智力开发对于自然-经济-社会复合生态系统的驾驭能力，要适应于可持续发展水平的要求。

在上述 5 个基本要素全部得到满足后，可以判断一个国家或地区人类生态系统的可持续发展能力，并可全面地比较不同国家或地区人类生态系统的可持续发展潜力，从而建立衡量不同国家或地区人类生态系统可持续发展水平的序列谱(图 19-9)。

2. 从系统特性出发来衡量人类生态系统可持续性

Convay、Marten 等人提出用生产力、稳定性、持久性、公平性、自立性和协调性等系统特性指标来衡量人类生态系统的可持续性。

1) 生产力。人类生态系统的生产力是指该系统为人类提供的能源和原料的数量。一个可持续的人类生态系统应该保持长期的高产，而一个低产的系统则不能认为是可持续的。人类生态系统的生产力可以用多种指标来度量，比如生物量、能量、物质数量、货币价值等，其中应用最普遍的指标是货币价值。显然，还必须联系每单位投入的产出来衡量人类生态系统的生产力。投入的形式有土地、劳动、资金、物资、能源等，一个人类生态系统的生产力会因投入形式的差异而大相径庭。因此，更合理的指标是相对于

一定投入形式的生产率，比如单位水资源投入的产出，单位能源投入的产出，单位资金投入的产出，单位劳动投入的产出等。人口密度大，劳动力充裕而资源相对稀缺的人类生态系统，很可能土地生产力高而劳动生产率低；人烟稀少，土地广阔的人类生态系统则相反，很可能土地生产率高而能源或资金的产出率低。

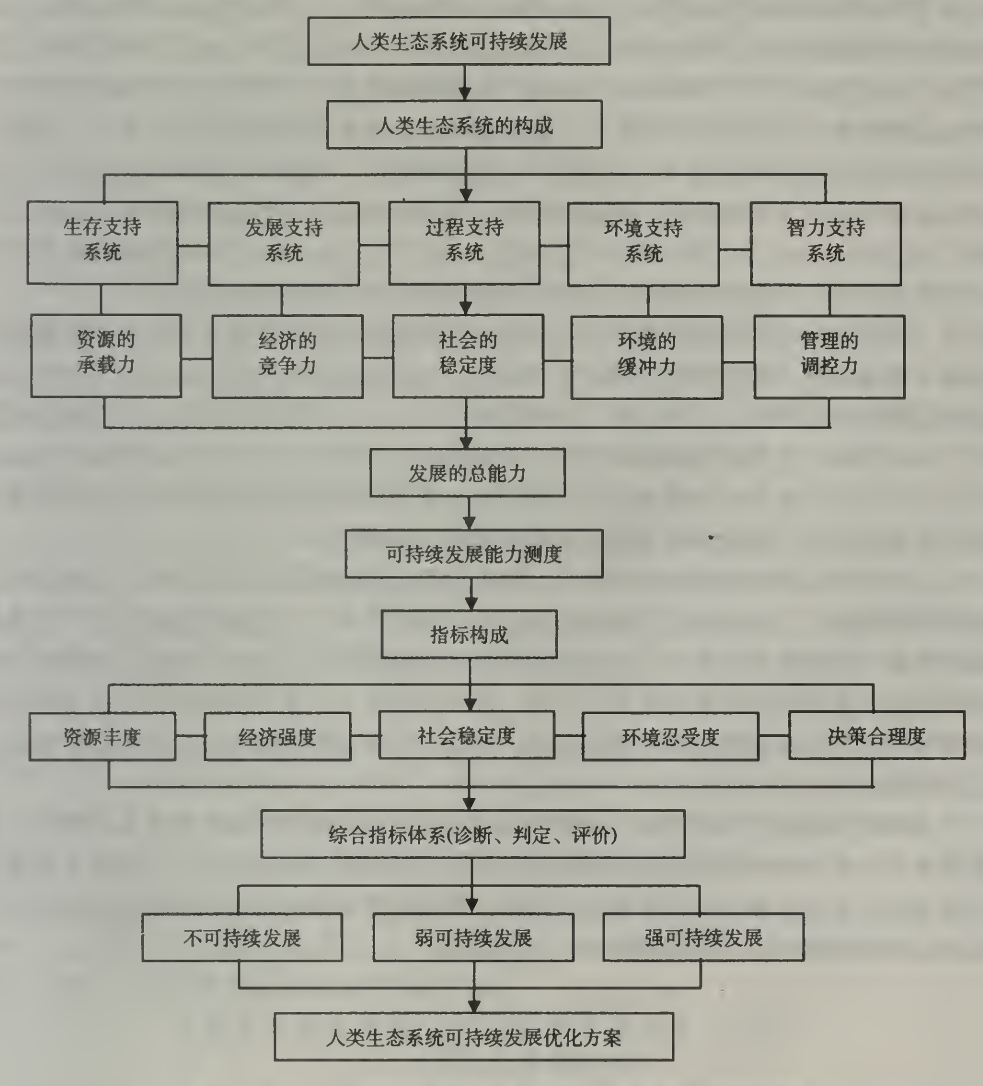


图 19-9 人类生态系统可持续发展的因子构成及评价程序

2) 稳定性。人类生态系统的稳定性是指该系统生产的一致性和连贯性。可持续人类生态系统的生产应长期保持在一定水平上，或在某一水平上略有波动；而生产大起大落的系统则缺乏稳定性，也不可能是可持续的。由于系统内外自然、经济、社会诸条件的变动，比如自然要素、人口、价格、政策等的正常波动，其生产力难免有所波动，稳定性要根据系统生产围绕某一长期平均水平或长期趋势的波动来评价。由于稳定性是系统生产力长期波动状态的度量，而生产力可以用多种指标度量，因此稳定性也是多维的。一定自然资源系统用某种生产力指标衡量可能是稳定的，而用另一种指标衡量则可

能是不稳定的，比如某系统实物产量是稳定的，但由于市场价格变化，用货币价值衡量则是不稳定的。

3）持久性。人类生态系统的持久性是指该系统对抗内外压力和变迁而保持生产力的能力。这里所说的压力和变迁，包括人口的增长、资源的耗竭趋势、自然灾害等，它们与稳定性所涉及的各种要素的正常波动是不同的概念。一个系统的持久性是靠系统本身的调控能力来实现的。在内外压力和变迁的作用下，系统生产力趋于下降；但依靠科学技术，通过加强经营管理和增加投入等，系统能够抵抗压力和变迁的影响或消除压力和变迁趋势而把生产恢复到正常水平，这样的人类生态系统就是持久的。反之，若在巨大压力和不可逆变迁的作用下，系统生产一蹶不振乃至“崩溃”，则无持久性可言。持久性也是联系生产力来度量的，因此同样可以用多种指标，而依据不同指标也就有不同的持久性表现。比如为了维持某种产品单位土地产出的持久性需要增加某种要素的投入，则单位土地产出保持了持久性，但该要素的单位产出却缺乏持久性。

4）公平性。人类生态系统的公平性是指该系统对资源和资源开发利用的收益是否公正而平等地分配。若大多数人获得中等收益，获得高收益和低收益的人都占少数，则该系统具有相对公平性；若大多数人只能获得低收益，少数人获得高收益，则该系统是不公平的。同时，公平性还包括代际公平。我们今天正在开发利用的自然资源，也是今后世世代代人赖以生存的物质基础，如果过度开发和不合理利用资源而损害了后代人利用同一资源的权利，则这样的人类生态系统就是不公平的。

5）自立性。人类生态系统的自立性是指该系统自我供给、自我完善、自我调节、自我恢复的能力。自立性是系统内各组成成分之间的物质、能量和信息的运动，进出系统的物质流、能量流和信息流，以及对这些运动的控制反映，过多地依赖外部物质、能量和信息投入维持运转的系统缺乏自立性。很多外部投入是不可靠的或代价昂贵的，一旦有变化就会危及系统的正常运转和安全。因此，一个可持续的人类生态系统应该有较强的自立性。

6）协调性。人类生态系统的协调性是指该系统内人类的需求(主要由人口数量与人均消费水平决定)与环境容量(包括资源承载能力与环境缓冲能力)相适应。根据生态学原理，在人类生态系统中，人口消费量的增长，必须控制在环境容量，即生态阈值之下，才能使人与环境相协调，使系统得以可持续发展。

（四）人类生态系统可持续发展的途径与对策

1）强化生态意识，树立全球观念。当前生态意识的核心是人与自然的关系。人类是地球生态系统的一员，应该与大自然建立一种密切的合作伙伴关系，共同组成一个和谐的有机整体，使人与自然协调发展。人类作为智慧动物，可以利用自然、改造自然，但人类对自然的开发利用必须持谨慎态度，必须尊重生态规律。为此，要加大生态环境保护宣传、教育力度，广泛利用各种新闻媒介，向广大公众普及生态环境保护知识，使公众树立全球观念，提高生态意识，自觉保护生态环境、积极参与全球生态环境保护行动。

2) 控制人口数量，提高人口素质。建立人口控制机制，搞好人口数量和结构控制规划，降低出生率，提倡适度消费，合理利用资源，保护资源基础和维持较高的生态环境质量，提高人类生态系统的承载能力，使人口数量控制在生态环境和资源承载能力之下。同时，要大力发展科技教育，加强人才培养，不断提高人口素质。

3) 用经济生态学的观点指导发展。长期以来，人们在经济发展中只注重量的增长、无视质的优化，只顾眼前利用、无视长远发展，只重视局部而无视整体，只注意产出而无视代价，造成资源的过度利用和生态环境的恶化。经济生态学的观点，强调经济效益、生态效益和社会效益的统一。人类社会生产与周围环境的物质交换过程，如果符合自然和经济发展的客观规律，就会促进生产的发展，并赢得多方面的经济效益。同时，生态环境质量也会得到改善。而生态环境的改善反过来又为发展生产创造有利条件，形成良性循环。

4) 应用绿色技术，促进系统发展。在人类影响日趋强烈的情况下，只靠生态系统自身的调节与恢复是难以令其达到稳态的。因此，在科学技术迅猛发展的今天，将绿色技术应用于人类生态系统的发展是至关重要的。这些绿色技术包括生物技术、基因工程、生态工程、环境污染控制技术、清洁生产技术、航空航天技术等。利用绿色技术，大力开展生态工程和生态工艺设计，加强生物多样性保护和受损生态系统的恢复，限制污染物排放，推广清洁生产，积极发展生态产业和环保产业。

5) 加强对人类生态系统的管理。随着人类生态系统复杂化和人类干扰程度的日益增加，加强对这个系统的管理显得日益重要。一方面，要强化对系统的宏观调控。通过采取行政管理与法律措施，对人类的各种行为进行规范和管理；另一方面，要加强对系统的监测、预警。通过建立监测网络，加强国际合作与研究，提高对人类生态系统的管理水平。

6) 因地制宜，注重整体与局部的统一。从全球的角度看，整个地球生物圈是一个巨大的复合人类生态系统，它由若干个彼此相互依存、相互制约的人类生态系统组成。要让生物圈这个最大的人类生态系统得以可持续发展，就要协调生物圈内各个人类生态系统的关系，不仅要注重单一系统的最优化，而且要力求各系统相互补充、相互促进、共同进化，注重局部效益与整体效益的统一。因此，在制定各地生态系统发展与管理规划时，应做到因地制宜、统筹兼顾，全面发展。加强地区之间、国家之间的沟通与合作，以利于全球人类生态系统的可持续发展。

三、展望人类的未来

(一) 罗马俱乐部与“人类困境”研究

1968 年 4 月，由来自意大利、美国等 10 个国家的科学家、教育家、人类学家和经济学家等聚集在世界上最古老的林赛罗马科学院，在意大利经济学家 Peccei 及西方经济合作与发展组织科学事务部主任金的鼓动和召集下聚会，讨论现在的和未来的人类困境这个令人震惊的问题。经过这次会议，罗马俱乐部由此而诞生。

罗马俱乐部是一个非正式的国际会议，恰当地说，它是一个“无形的学院”。罗马俱乐部从一开始就围绕全球问题，作了大量的研究和讨论。贝切伊等人认为，世界上有许多组织在研究和处理城市改进、农业、能源等问题，但却没有一个民间团体在总体上关心全球问题，以及探讨这个框架的各个方面的相互作用。因此，罗马俱乐部开创了对人类困境的研究，目的是考察给人类和所有国家造成不安中的复杂性问题：富足中的贫困、环境的退化、对制度丧失信心、就业等。

罗马俱乐部认为，目前人类的知识在不断地扩展，但对自己业已改变的生态环境却知之甚少，罗马俱乐部的建立，目的就是要带头反抗人类近乎自杀性的无知。罗马俱乐部为自己拟定了两条宗旨，一是促进和传播对人类困境的理解，二是在人类一切知识的基础上，激励那些能纠正现状的新的态度、政策和制度。罗马俱乐部以研究“人类困境”而闻名于世。

罗马俱乐部的“人类困境论”认为，“人类困境”，是人类缺乏自然界其他物种的生存智慧、自我调节机制、动态平衡的危机。现代的全球危机，是人类缺乏对全球问题的理解和责任感而导致的结果。同时，罗马俱乐部认为，“人类困境”是人类的内部危机，是人类后天的文明危机和文化危机。

罗马俱乐部最著名的报告之一《增长的极限》，从人口、资金、粮食、不可再生资源、环境等重大全球因素出发，建立了全球分析模型，按照模型的分析计算，得出 20 世纪末和 21 世纪初，将达到全球性的增长极限的结论，根据预测分析，他们告诫各国应慎重地对待目前的经济增长，提出一系列增长方面的政策性意见——零增长。他们被称为未来学派中的悲观派。

《增长的极限》发表以后，不仅引起世界一些人士的赞赏与附和，也引起一些人士的激烈批评。由此展开了乐观主义者和悲观主义者的激烈辩论。在荷兰的阿姆斯特丹，甚至出现了题为《反对罗马俱乐部》的著作，其批评方面的主要观点是：《增长的极限》是关于世界末日的神话，《增长的极限》主张零增长论，不能达到生态平衡的目的，零增长将大大加剧社会的不平等，零增长将大大降低社会效率，零增长不可能在世界范围内实现。以后，罗马俱乐部部分地修正了自己的观点，把增长的极限，从零增长论转向有机的增长，从物理极限转向社会极限，强调把经济学和生态学结合起来，用“新人道主义”去指导人的革命等。

虽然罗马俱乐部的观点和理论是世界上全球问题研究中悲观主义思潮代表，虽然它的“人类困境论”的一些论点，引起了世界性的大争论，但是，罗马俱乐部仍不失为一个著名的国际性未来研究团体，它所创立的应用现代科学的“全球模拟方法”，应用系统方法和计算机技术，是目前研究中相当有效的手段。但是，全球模拟也有其局限性和缺陷，因为任何全球模式都是复杂的社会、人类、世界的简化图像，所有的变量因素、集合都带有建立模型者的某种主观片面性。重要的是，除“全球模拟方法”外，罗马俱乐部对人类最大的贡献还在于它在吸引世界舆论注意当代全球问题方面的功绩，这一点是全世界共认不讳的。

（二）技术至上的乐观主义派

乐观主义以美国赫德森研究所所长康恩和 Simon 等为代表。Simon 针对《增长的极限》写了《最后的资源》(即中译本《没有增长的极限》)这一名著。

1976 年，康恩等人发表了《下一个 200 年——关于美国和世界的情景描述》，对《增长的极限》几乎是逐条批判，称之为“新马尔萨斯主义”，从而开始了乐观主义和悲观主义在全球问题上的长期对峙局面。康恩等人认为，未来确有可能潜在不幸的危机，但绝不是人类必定遭到不可避免的毁灭性命运的预言，增长是不可以缺少的，同时也会有机会增长。

1981 年 Simon 在《最后的资源》中更为明确地显露其观点，与《增长的极限》中的悲观论点形成尖锐的对立面。认为，全部生态灾难是现行工艺的后果，在现存资本主义条件下，资产阶级社会通过科学技术进步，生产工艺的完善能解决所有问题，因而他们对人类环境和人类社会的未来持高度乐观的态度，并认为人类社会正在进入历史上最有创造性的时代，人类将战胜现在和未来可能出现的一切困难。

康恩等人对人类的未来作了两种设想，一种“以地球为中心”，即假定在今后的 200 年内，人类大部分仍然居住在地球上，只是偶尔到大气层以外去进行有限的探险和开发， 这对人口增长率没有太大影响，也不会从根本上改变世界总产值的增长率。另一种则“以空间为世界”，设想 21 世纪，人类借助科学技术能频繁地到大气圈以外去进行活动，包括原料加工、能源生产，同时可以在太空中建立大规模的生产基地，把所生产的物质除用于基地内部消费外，还向地球和其他太阳系基地输出，这样，人口问题可以通过移民到太空这一途径解决。康恩等人认为，即使按第一种设想估计，200 年后的 2175 年，世界人口虽可达到 150 亿，世界总产值按现在的增长预测，可以达 300 万亿美元，人均所得 2 万美元，可以说是生活比较富裕的人控制自然了。

以康恩为代表的乐观主义未来派，对人类面临的全球问题和科学技术进步前进的速度之间的关系缺乏一种科学的态度，特别对现实中已存在的环境、资源等问题及其对策缺乏正视和积极解决的态度，被一些国家称之为“贩卖玫瑰色未来的推销员”。但是，在相信人类的技术总要进步，智能圈总是在进步以及他们所使用的历史外推法等方法上， 乐观主义的视野有的方面也是可取的。

（三）国际生态机构的努力

生态环境问题的解决，关系着人类生态系统的正常运行和人类的未来。20 世纪 70 年代以来，一些国际组织纷纷建立，并为全球生态环境的改善做出了不懈的努力和巨大的贡献。

1. 联合国及其有关组织

由于生态危机的全球化特点，需要做出全球性的反应，需要系统地制定和贯彻全球性的环境政策和方案，并需要一个拥有权力和权威的国际生态机构。迄今为止，联合国

及其有关组织已成为肩负此重任的国际机构，并为解决全球性生态危机做出了巨大努力。这些国际组织主要有：联合国环境规划署、联合国教科文组织、人与生物圈委员会(MAB)、世界卫生组织(WHO)、世界银行、世界粮农组织(FAO)和国际科联环境问题科学委员会(SCOPE)等。

1) 联合国环境规划署。20 世纪 70 年代初，联合国环境规划署把“生态发展”确定为按生态学要求而健康地从事社会和经济的发展，并把建立人类与环境之间的和谐关系作为自己奋斗的宗旨。经过联合国环境署的不懈努力，大大推进了全球生态环境建设和人类社会的可持续发展进程。

2) 联合国教科文组织。联合国教科文组织在保护自然和文化方面为人类做出了卓越的贡献。教科文组织在领导和组织国际合作、拯救濒危物种、建立自然保护区、修建埃及法老拉美西斯巨大塑像、中爪哇佛教遗迹婆罗浮屠佛像以及意大利中世纪文艺复兴时期的精品等世界遗产方面，都做出了巨大努力。特别值得一提的是“国际人与生物圈计划”(MABP)。MABP 是教科文组织针对全球日益突出的人口、资源、环境问题，于 1971 年实施的一项长期的政府间研究与培训计划。其任务是通过全球性的科学研究、培训、示范及信息交流，为全球自然资源与环境的合理利用和保护提供科学依据。MABP 的总目标是通过自然科学和社会科学所包括的多学科的共同努力，着重研究和监测人类今天的活动对未来世界的影响，以保证资源的合理利用和保护，使社会发展和资源保护相协调，确保在人口合理增长的情况下使环境的生产力、基因的多样性和生活环境的质量得到保持和提高，从而保证人类社会经济的可持续发展和人类的繁衍与生存。

2. 国际绿色和平组织

国际绿色和平组织为国际民间组织，由加拿大一位工程师发起，于 1971 年成立，总部设在英国伦敦，有 70 余万名会员分布于美国、加拿大、德国等十几个国家。她是当今世界一个有代表性的国际生态环境保护组织。在环境与发展问题上受“反增长论”的影响，并经常采取激进的行动。但该组织在反对污染、保护环境，唤起人们生态意识、环境觉悟以及敦促有关国家采取措施控制污染等方面，起到了促进作用。

（四）立足现在，放眼未来

毋庸讳言，在全球问题上，人类正面临着严重的困境。但我们不赞成罗马俱乐部的悲观主义思潮和对未来看法的片面性，我们坚信，在可持续发展战略的指导下，人类终将能走出困境，找到摆脱生态危机的办法，我们有理由对未来持积极乐观的态度。我们也不赞成乐观派盲目乐观的想法，人类对解决生态问题的艰巨性及所要付出的努力和代价应有清醒的认识。我们要积极行动起来，关注和保护我们共同的家园——地球，使人口、资源、环境相协调，促进人类生态系统的可持续发展。

我们坚信，人类的未来必将更加美好！

参 考 文 献

阿兰兰德尔著. 1989. 资源经济学. 施以正译. 北京：商务印书馆
白伟岚，任建武. 2000. 居住区环境绿化质量的探讨. 中国园林, (1)：37~42
包维楷，陈庆恒. 1999. 退化山地生态系统恢复和重建问题探讨. 山地学报，17(1)：22~27
保继刚，楚义芳，彭华. 1993. 旅游地理学(第二版). 北京：高等教育出版社
保继刚，楚义芳. 2000 旅游地理学 北京：高等教育出版社
保继刚. 1996. 旅游开发研究——原理、方法、实践. 北京：科学出版社
北京大学中国可持续发展研究中心. 1995. 可持续发展之路. 北京：北京大学出版社
北京林业学院城市园林系. 1985. 园林树木学
卞有生等. 2000. 国内外生态农业对比——理论与分析. 北京：中国环境科学出版社
宾光楣. 2001. 堤岸防护工程综述. 人民黄河
蔡晓明. 2000. 生态系统生态学. 北京：科学出版社
蔡运龙. 2000. 自然资源学原理. 北京：科学出版社
曹志平. 1999. 生态环境可持续管理. 北京：中国环境科学出版社
曹忠杰，林素兰，贾天会. 2001. 辽东山区柞蚕土壤侵蚀研究. 水土保持研究，8(1)：139
陈昌笃主编. 1993. 持续发展与生态学. 北京：中国科技出版社
陈传宏. 2001. 21 世纪中国环境保护与生态建设科技发展战略研究. 北京：中国环境科学出版社
陈芳清，王祥荣. 2000. 从植物群落学的角度看生态园林建设——以宝钢为例. 中国园林, (5)：35~37
陈怀顺. 2000. 西藏日喀则地区草地资源现状及其可持续利用探讨. 草业科学，17(6)：7~11
陈基湘，姜学民. 1998. 试论自然资源分配的公平性. 资源科学，20(3)：1~5
陈静生等. 2001. 人类—环境系统及其可持续性. 北京：商务印书馆. 287~299
陈琨. 1997. 当前全球可持续发展的趋向. 中国人口、资源与环境，7(3)：92~93
陈林，屠玉麟. 2000. 贵州喀斯特山区生态农业问题及其对策. 贵州环保科技，6(1)：16~20
陈灵芝主编. 1993. 中国生物多样性. 北京：科学出版社
陈敏豪著. 1988. 人类生态学. 上海：复旦大学出版社
陈雪峰. 1996. 中国森林资源可持续发展的探讨. 自然资源学报, (4)：318~325
陈自新，苏雪痕等. 1998. 北京城市园林绿化生态效益的研究. 中国园林, (6)：53~56
陈自新. 1998. 城市园林绿化与城市可持续发展. 中国园林, (4)：4~5
成升魁. 1998. 资源科学几个问题探讨. 资源科学，20(2)：1~10
成升魁. 2000. 资源综合研究问题探讨. 资源科学，22(1)：1~4
成升魁等. 1992. 生存发展与生态. 见：海峡两岸经济持续发展与资源环境问题. 北京：中国科学技术出版社
程占红，张金屯. 1999. 关于旅游对植被影响的一点思考. 山西大学学报(自然科学版)，22(3)：297~301
程占红，张金屯. 2000. 天龙山旅游开发对植被的影响. 地理科学，20(2)：144~147
程占红. 2001. 生态旅游社区从事旅游业者的行为特征研究. 山西大学学报(自然科学版)，24(2)：159~163
楚义芳. 1991. 超载、旅游污染及其控制. 地理学与国土研究 (1)：58~61
楚义芳. 1992. 旅游的空间经济分析. 西安：陕西人民出版社
慈龙骏. 1994. 全球变化对我国荒漠化的影响. 自然资源学报，9(4)：289~303
崔凤军. 1995. 论旅游环境承载力. 经济地理, (1)：105~109
戴维皮尔斯等. 1997. 世界无末日——经济、环境与可持续发展. 张世秋等译. 北京：中国财政经济出版社
戴星翼. 1995. 中国的持续发展问题. 人口与经济, (5)：10~19
道尔吉帕拉木. 1996. 集约化草地畜牧业. 北京：中国农业科技出版社. 55

邓培雁. 2000. 贵州喀斯特地区种子植物物种多样性受损现状与对策. 贵州环保科技，6(1)：21~26
丁岩钦. 1994. 昆虫数学生态学. 北京：科学出版社
董光荣，高尚玉，金炯等. 1993. 青海共和盆地土地沙漠化与防治途径. 北京：科学出版社
董继惠等. 1989. 我国草原鼠害及其控制. 见：中国草地科学与草业发展. 北京：科学出版社. 111~116
董锁成，张文中，方创琳. 1999. 资源、环境与经济作用机制和规律探讨. 资源科学，21(4)：15~21
段宁. 1995. 一轮新的挑战和机会——谈谈中国清洁生产. 北京：中国环境科学出版社. 14~36
范可，上官铁梁等. 2001. 太原市清洁生产评价指标体系研究. 山西大学学报(自然科学版)，24(4)
封志明，王勤学. 1993. 资源科学研究的历史进程. 自然资源学报，(3)
封志明，王勤学. 1994. 资源科学论纲. 北京：地震出版社
封志明. 2000. 20 世纪的资源科学思想. 资源科学，22 (5)：1~6
冯向东. 1988. 略论城市生态规划. 生态学杂志，7(1)：33~36
傅伯杰. 1990. 国际景观生态研究的发展动态与趋势. 地球科学进展，(3)
傅伯杰等. 2001. 景观生态学原理及应用. 北京：科学出版社. 310~314
甘肃农业大学. 1999. 草原保护学(第一分册)——草原啮齿动物学. 北京：中国农业出版社
高吉喜. 2001. 可持续发展理论探索——生态承载力理论、方法与应用. 北京：中国环境科学出版社. 58~75
高甲荣，肖斌. 1998. 生态学的新发展——森林界面生态学. 西北林业学报，(3)：68~73
高琼等. 1994. 松嫩平原碱化草地植物环境系统仿真模型. 植物生态学报，(8)：56~67
高琼等. 1996. 碱化草地景观动态及其对气候变化的响应与多样性和空间格局的关系. 植物学报，38(1)：18~30
高志刚等. 2001. 知识经济时代资源开发利用的变化趋势对资源系统的影响及调控. 资源科学，23(3)：4~9
戈峰，丁岩钦，马世骏. 1993. 棉田害虫生态调控的原理与方法. 见：全国首届新学说新观点学术讨论会论文集. 北京：中国科学技术出版社. 214~217
龚子同，史学正. 1990. 我国土地退化及其防治对策. 见：中国土地退化防治研究. 北京：中国科学出版社. 15~20
关秀清，于井朝. 1997. 草地生物固氮与集约化草地畜牧业. 草业科学，14(3)：12~16
郭来喜，吴必虎，刘锋等. 2000. 中国旅游资源分类系统与类型评价. 地理学报，55(3)：294~301
国家环境保护局. 1996. 企业清洁生产审计手册. 北京：中国环境科学出版社
国家科学技术委员会. 1990. 中国科学技术蓝皮书第 5 号气候. 北京：科学文献出版社
国家自然科学基金委员会. 1997. 生态学. 北京：科学出版社
国务院农村发展研究中心，中国农业科学院家业经济研究所编辑组. 1985. 中国农村发展战略问题. 北京：中国农业科技出版社
韩威. 1994 经济生态 北京：人民出版社. 33~37
何萍等. 2001. 长江中上游安宁河流域天然草场退化情况及防治对策. 草业科学，18(1)：4~6
何强，井文涌，王翊亭. 1994. 环境学导论. 北京：清华大学出版社
河北农业大学主编. 1985. 林学概论. 北京：农业出版社
洪利兴等. 2000. 我国南方马尾松生态系统的退化特征和改造对策研究. 浙江林业科技，(2)：1~9
黄秉维等. 1999. 现代自然地理. 北京：科学出版社
黄鼎成等著. 1997. 人与自然关系导论. 武汉：湖北科学技术出版社
黄富祥，高琼，赵世勇. 2000. 生态学视角下的载畜量概念. 草业学报，17(9)：48~57
黄晓雷. 1999. 初谈生态园林. 生态科学，(3)：76~77
黄晓鸾等. 1998. 城市生存环境绿色量值群的研究(3)——国内外园林绿地功能量化研究. 中国园林，(3)：57~59
黄杏元. 1989. 地理信息系统发展趋势. 地理学报，44(2)：230~236
霍明远. 1998. 资源科学的内涵与发展. 资源科学，20(2)：11~16
吉林林业学校，四川林业学校等. 1982. 森林学. 北京：中国林业出版社
贾灵等. 1998. 全球环境变化——人类面临的共同问题. 武汉：湖北教育出版社
江苏省科学技术协会. 1997. 城市化进程与城市可持续发展. 南京：东南大学出版社
姜恕等. 1988. 草地生态学研究方法. 北京：农业出版社
姜学民. 1993. 经济生态学通论. 北京：中国林业出版社. 124~128，61~79
蒋尤泉等. 1989. 我国牧草遗传资源的潜力和发展对策. 见：中国草地科学与草业发展. 北京：科学出版社. 63~69
蒋志刚，马克平，韩兴国. 1997. 保护生物学. 杭州：浙江科学技术出版社

解振华. 1991-8-23. 中国的环境问题和发展政策——在香港94环保博览会期间的讲话. 中国环境报
金鉴明，王礼嫱，薛达元等. 1991. 自然保护概论. 北京：中国环境科学出版社
金岚，王振堂，朱秀丽，张月娥，盛连喜. 1992. 环境生态学. 北京：高等教育出版社
景贵和. 1990. 现代生态学透视. 北京：科学出版社
康慕谊. 1997. 城市生态学与城市环境 北京：中国计量出版社
孔繁德. 2001. 生态保护概论. 北京：中国环境科学出版社. 244~264
蓝盛芳，钦佩. 2001. 生态系统的能值分析. 应用生态学报，12(1)：129~131
雷毅. 2000. 生态伦理学. 西安：陕西教育出版社. 283~284
雷毅. 2001. 深层生态学思想研究. 北京：清华大学出版社
李爱贞. 2001. 生态环境保护概论. 北京：气象出版社. 272~274
李博. 1990. 中国的草原. 北京：科学出版社
李博. 1992. 我国草地生态研究的成就与展望. 生态学杂志，11(3)：1~7
李博等. 1991. 草地生态学的发展. 见：中国生态学发展战略研究. 北京：中国经济出版社. 379~404
李博等. 1993. 普通生态学. 呼和浩特：内蒙古大学出版社
李博等. 2000. 生态学. 北京：高等教育出版社
李博文集编辑委员会. 1999. 李博文集. 北京：科学出版社
李春秋等. 1994. 生态伦理学. 北京：科学出版社
李国鼎. 1994. 固体废物处理与资源化. 北京：清华大学出版社
李哈滨等. 1988. 景观生态学—生态学领域里的新概念的构架. 生态学进展，6(3)
李洪远. 2000. 对区域性生态园林建设的认识与思考. 中国园林, (6)：19~22
李金昌等. 1999. 生态价值论. 重庆：重庆大学出版社. 47~70
李晋川，白中科等. 2000. 露天煤矿土地复垦与生态重建. 北京：科学出版社
李文华，赵献英. 1984. 中国的自然保护区. 北京：商务印书馆
李新国. 1999. 面向21世纪的可持续林木遗传改良. 世界林业研究, (1)：12~15
李英年. 2000. 高寒草甸牧草产量和草场载畜量模拟研究及对气候变暖的响应. 草业学报，17(2)：77~82
李永宏等. 1994. 内蒙古主要草原植物群落地上生物量和理论载畜量及其气候的关系. 干旱区资源与环境，8(4)：43~50
李毓堂. 2000a. 推动未来中国农业持续高效发展的新战略——草地资源开发和发展知识密集型草产业. 中国草地，9(1)：1~3
李毓堂. 2000b. 大西北和黄河流域生态治理与经济发展新方略——以草产业为基础、草林牧农工商相结合综合治理发展. 草业科学，9(1)：60~64
李贞，保继刚，覃朝锋. 1998. 旅游开发对丹霞山植被的影响研究. 地理学报，53(6)：554~561
李振基等. 2000. 生态学. 北京：科学出版社. 380~391
力振基等. 2000. 生态学. 北京：科学出版社
廖仰南. 1985. 内蒙古草原土壤微生物生态学研究. 见：草原生态系统研究(第二集). 北京：科学出版社
林晨，王紫雯. 1998. 城市行道树规划的生态学探讨. 中国园林, (6)：41~42
林鹏. 1997. 中国红树林生态学. 北京：科学出版社
林庆发. 1996. 山区生态经济沟发展模式的研究. 生态农业研究，4(1)
刘爱民，封志明等. 2000. 现代精准农业及我国精准农业的发展方向. 中国农业大学学报，5(2)：20~25
刘安国. 1981. 捷克斯洛伐克的景观生态研究. 地理科学, (2)
刘成武，杨志荣，方中权等. 1999. 自然资源概论. 北京：科学出版社
刘鸿雁，张金海. 1997. 旅游干扰对香山黄栌林的影响研究. 植物生态学报，21(2)：191~196
刘鸿雁. 1994. 旅游生态学——生态学应用的一个新领域. 生态学杂志，13(5)：35~38
刘建国. 1992. 当代生态学博论. 北京：中国科学技术出版社
刘静玲等. 2001. 人口、资源与环境. 北京：化学工业出版社
刘力，于爱敏. 2001. 世界可持续农业发展模式比较研究. 世界地理研究，10(1)：41~45
刘培桐，王华东，薛纪渝. 1985. 环境学概论. 北京：高等教育出版社
刘清泉等. 1994 绿色文明. 太原：山西高校联合出版社.
刘曙光. 1990. 景观生态学与景观生态规划. 自然资源译丛, (4)

刘天齐，林肇信，刘逸农. 1982. 环境保护概论. 北京：高等教育出版社
刘天齐. 1990.环境管理. 北京：中国环境科学出版社
刘晓冰，保继刚. 1996. 旅游开发的环境影响进展. 地理研究，15(4)：92~99
刘胤汉. 1988. 自然资源学概论. 西安：陕西人民出版社
刘有恒等. 1990. 庭院经济实用技术手册. 长沙：湖南科学技术出版社
刘育蓓. 1999. 清洁生产与可持续发展. 贵州师范大学学报(自然科学版)，(17)：81~84
刘振礼. 1992. 旅游对接待地的社会影响及对策. 旅游学刊，7(3)：52~55
卢琦，慈龙骏. 1998. 中国荒漠化灾害评价、防灾减灾对策及受影响地区可持续发展研究. 中国沙漠，18(1)：167~171
陆林. 1996. 旅游地居民态度调查研究. 自然资源学报，11(4)：377~382
陆庆光. 1993. 试用赤眼蜂防治仓库害虫. 世界农业, (2)：37~39
吕国平. 2001. 论与可持续发展思想相适应的新资源观. 资源科学，23(3)：1~3
骆世明等. 2001. 农业生态学. 北京：中国农业出版社
骆天庆. 2000. 近现代西方景园生态设计思想的发展. 中国园林, (3)：81~83
马传栋. 1995. 资源生态经济学. 济南：山东人民出版社
马克平. 1993. 试论生物多样性的概念. 生物多样性，1(1)：20~22
马世俊等. 1984. 社会-经济-自然复合生态系统. 生态学报，4(1)：1~9
马世骏等. 1990. 现代生态学透视. 北京：科学出版社
马志正，韩军青. 1998. 黄土高原地貌、环境、灾害. 北京：中国环境科学出版社
毛文永，文剑平. 1993. 全球环境问题与对策. 北京：中国科学技术出版社
毛文永. 1998. 生态环境影响评价概论. 北京：中国环境科学出版社. 160~192
米都斯著. 1984. 增长的极限. 李宝恒译. 成都：四川人民出版社. 19，45
宁夏回族自治区绿化委员会办公室、银川市园林管理局主编. 1987. 城镇园林绿化. 银川：宁夏人民出版社
农业部畜牧司全国畜牧兽医总站. 1996. 中国草地资源. 北京：中国科学技术出版社
欧阳吉华. 1998. 园林艺术中的点、线、面. 中国园林, (3)：37~40
欧阳志远著. 1994. 生态化——第三次产业革命的实质与方向. 北京：中国人民大学出版社. 180~186
潘文灿. 2001. 21世纪我国国土资源可持续利用的形势及战略措施. 中国人口、资源与环境，11(1)：8
彭祥林，贾恒义. 1997. 黄土高原草地土壤生态. 北京：世界图书出版公司
钱易. 1998. 清洁生产与可持续发展. 中国清洁生产，1(1)：6~10
钱易等. 2000. 环境保护与可持续发展. 北京：高等教育出版社. 132~135
钦佩，安树青，颜京松等. 1998. 生态工程学. 南京：南京大学出版社
邱新法，曾燕等. 2001. 我国沙尘暴的时空分布规律及其源地和移动路径. 地理学报，56(3)：316
邱扬，张金屯. 1999. 关帝山八水沟天然植物群落时空梯度的数量分析. 应用与环境生物学报，5(2)：113~120
曲格平. 1999. 环境保护知识读本. 北京：红旗出版社
曲仲湘，吴玉树，王焕校等. 1989. 植物生态学(第二版). 北京：高等教育出版社
瞿辉. 1997. 论园林中的植物造景. 中国园林, (4)：50~51
全国生态农业县建设领导小组办公室. 1999. 中国生态农业. 北京：中国农业科技出版社
任海等. 2001. 恢复生态学导论. 北京：科学出版社
任继周. 1995. 草地农业生态学. 北京：中国农业出版社
任继周. 1998. 草业科学研究方法. 北京：中国农业出版社
任立忠等. 2000. 抚育采伐对山杨次生林植物多样性影响的研究. 北京林业大学学报, (4)：14~17
容洞谷，成升魁. 1998-01-19. 重视和加强资源综合研究. 光明日报
陕西省气象局，气象台. 1976. 陕西省灾害史料
上官铁梁，张峰等. 1999. 芦芽山自然保护区种子植物区系地理成分分析. 武汉植物学研究，17(4)：323~331
上官铁梁等. 2000. 清洁生产及其生态经济原则和意义初探. 见：跨世纪的抉择. 太原：山西科学技术出版社. 149~151
尚玉昌，蔡晓明. 1992. 普通生态学(上、下册). 北京：北京大学出版社
沈兵. 1998. 西双版纳园林植物配置特点和剖析——以景洪市为例. 中国园林, (3)：31~33
师长兴等. 2000. 中国洪涝灾害与泥沙关系. 地理学报，55(5)：627~634
史捍民. 1997. 企业清洁生产实施指南. 北京：化学工业出版社

史同广. 1998. 生态农业与农业可持续发展. 农业环境与发展, (3)
世界自然保护联盟等. 1992. 保护地球可持续生存战略. 北京：中国环境科学出版社
舒惠国. 2001. 生态环境与经济生态. 北京：科学出版社. 39~79
四川师范学院，山东大学等. 1987. 生态学概论. 北京：科学出版社
宋永昌，由文辉，王祥荣. 2000. 城市生态学. 上海：华东师范大学出版社
苏伦·埃尔克曼著. 1999. 工业生态学. 徐兴元译. 北京：经济日报出版社.16~33
苏志珠等. 2000. 黄土高原地区可持续发展问题的生态建设对策研究. 山西大学学报，23(增刊)：13~17
苏智先等. 1989. 生态学概论. 济南：山东大学出版社. 276~314，313~314
孙成仁，杨岚等. 1998. 寒地城市园林空间环境的设计与创造. 中国园林, (5)：51~53
孙鸿烈，封志明. 1998. 资源科学研究的现在与未来. 资源科学，20(1)：1~12.
孙鸿烈. 2000. 中国资源科学百科全书. 北京：中国大百科全书出版社，石油出版社
孙儒泳，李博，诸葛阳等. 1993. 普通生态学. 北京：高等教育出版社
孙儒泳. 1992. 动物生态学原理(第二版). 北京：北京师范大学出版社. 385
孙铁珩，周启星等. 2001. 污染生态学. 北京：科学出版社
孙玉军，王如松. 2000. 生态旅游景区环境容量研究. 应用生态学报，11(4)：564~566
唐邦兴等. 1994. 山洪泥石流滑坡灾害及防治. 北京：科学出版社
唐维新. 1999-06-01. 江河源头话生态. 科学日报
陶战等. 1999. 我国“十五”计划期间推进生态农业发展的目标和措施. 农业环境与发展，16(3)
滕藤主编. 2001. 中国可持续发展研究(上、下卷). 北京：经济管理出版社. 593~602
佟新著. 2000. 人口社会学. 北京：北京大学出版社. 454~459
汪纪戎. 1998. 中国推行清洁生产的进展与对策·中国清洁生产，(1)：1~2
王宝贞. 1990. 水污染控制工程. 北京：高等教育出版社
王秉洛. 1998. 城市绿地系统生物多样性保护的特点和任务. 中国园林, (1)：4~7
王伯荪，彭少麟. 1997. 植被生态学. 北京：中国环境科学出版社
王伯荪. 1987. 植物群落学. 北京：高等教育出版社
王丹妮，狄洪发. 1998. 园林绿化与人居环境. 中国园林, (4)：9~12
王焕校. 1990. 污染生态学基础. 云南：云南大学出版社
王豁然，江泽平. 1998. 论林木引种与森林可持续经营. 世界林业研究, (4)：17~20
王军，傅伯杰，陈利顶. 1999. 景观生态规划的原理和方法. 资源科学，21(2)：71~76
王克敏. 2000. 经济伦理与可持续发展. 北京：社会科学文献出版社. 214~251
王明玖，马长升. 1994. 两种方法估算草地载畜量的研究. 中国草地, (5)：19~22
王庆瑞. 1962. 天祝牧场羊群“野营座圈”对草场生产力影响的初步研究. 甘肃师范大学学报(自然科学版), (3)：1~7
王如松，周启星，胡聃. 2000. 城市生态调控方法. 北京：气象出版社
王如松. 2000. 转型期城市生态学前沿研究进展. 生态学报，20(5)：837
王松霈. 2000. 生态经济学. 西安：陕西人民教育出版社
王伟中. 1999. 地方可持续发展导论. 北京：商务出版社
王祥荣. 1998. 生态园林与城市环境保护. 中国园林, (2)：14~16
王祥荣. 2000. 生态与环境——城市可持续发展与生态环境调控新论. 南京：东南大学出版社
王小荣，卢山等. 2000. 城市园林绿化特色性研究. 浙江林学学报, (2)：150~154
王晓俊. 1993. 美国风景资源管理系统及其方法. 自然资源学报，8(4)：371~380
王勇进，李沛琼. 2000. 深圳市园林绿化树种的调查与评估. 中国园林, (1)：49~52
王铮. 1992. 现代理论地理学. 北京：科学出版社
魏勇等. 2000. 山东省海岸带复合农林业的经营类型及模式优化研究初报. 南京林业大学学报，24(1)：81~85
魏芝琴，姜来成等. 1998. 城市生态园林初探. 防护林科技, (3)：48~50
吴必虎. 1996. 旅游生态学与旅游目的地的可持续发展. 生态学杂志，15(2)：37~43
吴承照. 1998. 现代旅游规划设计原理与方法. 青岛：青岛出版社
吴承祯，洪伟等. 2000. 我国森林凋落物研究进展. 江西农业大学学报, (3)：405~409
吴传钧. 1988. 自然资源研究的新趋势. 自然资源, (1)

吴季松. 1998. 知识经济. 北京：北京科学技术出版社
吴家正等. 1998. 可持续发展导论. 上海：同济大学出版社. 14~15
吴天马. 2000. 实施农业清洁生产势在必行. 环境导报，(4)1~4
吴维群. 2001. 在西部大开发中加快云南草地的保护和建设. 草业科学，2：21~27
吴征镒等. 1980. 中国植被. 北京：科学出版社
伍世良，邹桂昌，林健枝. 2001. 论中国生态农业建设的五个基本问题. 自然资源学报，16(4)：320~324
奚旦立，孙裕生，刘秀英. 1987. 环境监测. 北京：高等教育出版社
夏菁华. 1999. 试论城市生态园林建设的地区特色与艺术个性. 中国园林，(3)：43~44
现代地理学辞典编辑委员会. 1990. 现代地理学辞典. 北京：商务印书馆
项斌等. 1996. 紫花苜蓿对 CO_2 倍增的反应生态生理研究和模型拟合. 植物学报，38(1)：63~71
肖德木. 1993-12-15. 草地亮出"黄牌". 经济参考报
肖笃宁等. 1991. 景观生态学理论方法及应用. 北京：中国林业出版社
肖平. 1994. 对自然资源的再思考. 自然资源学报，9(3)：280~287
肖向明等. 1996. 内蒙古锡林河流域典型草原初级生产力和土壤有机质的动态及其对气候变化的反应. 植物学报，38(1)：45~52
肖杨. 1998. 林木培育. 北京：中国农业科技出版社
辛国荣，韩烈保. 2000. 国外优良草坪草在广州引种适应性研究. 林业大学学报，(2)：60~64
徐化成. 1996. 景观生态学. 北京：中国林业出版社
徐汝梅. 1987. 昆虫种群生态学. 北京：北京师范大学出版社
徐在庸. 1981. 山洪及其防治. 北京：水利出版社
徐中民等. 2000. 可持续发展定量研究的几种新方法评介. 中国人口、资源与环境，10(2)：63
许慧，王家骥. 1993. 景观生态学的理论与应用. 北京：中国环境科学出版社
薛达元，蒋明康. 1994. 中国自然保护区的建设与管理. 北京：中国环境科学出版社
延军平. 1980. 灾害地理学. 西安：陕西师大出版社
延军平等. 1999. 跨世纪全球环境问题及行为对策. 北京：科学出版社
延晓冬，赵士洞. 1995. 长白山森林的生长演替计算机模拟模型的研究. 生态学报，15(增刊 B)：12~23
闫大成，解孝满. 1999. 山东省林木种苗经营管理存在的问题及对策. 山东林业科技，(5)：42~45
颜京松，王如松. 2001. 近十年生态工程在中国的进展. 农村生态环境，17(1)：1~8，20
杨才敏. 1995. 晋西黄土丘陵沟壑区水土流失综合治理开发研究. 北京：中国科学技术出版社
杨凤英，尹福建. 1997. 山西省自然保护区开展旅游问题的探讨. 山西林业科技，(4)：39~44
杨桂华等. 2000. 生态旅游. 北京：高等教育出版社. 198~218
杨建新. 1998. 论清洁生产向工业生态学的转化. 环境科学进展，(6)：582~88
杨京平主编. 2001. 农业生态工程与技术. 北京：化学工业出版社
杨文宪，张秋明等. 1999. 生态农业工程技术. 北京：中国农业科技出版社
姚愉芳. 1998. 中国经济增长与可持续发展——理论、模型与应用. 北京：社会科学文献出版社
叶笃正. 1992. 中国的全球变化预测研究. 北京：气象出版社
由文辉. 1998. 生态工程原理与应用. 上海：华东师范大学出版社
于志熙. 1992. 城市生态学. 北京：中国林业出版社
余谋昌. 1991. 生态学哲学.云南：云南人民出版社
云正明，刘金铜等. 1999. 生态工程. 北京：气象出版社
张崇岱等. 1991. 旅游环境容量理论及其在黄山风景区的应用. 安徽环境科学，(1)：19~26
张帆. 1999. 环境与自然资源经济学. 上海：上海人民出版社. 30~100
张家诚. 1989. 自然灾害的初步探讨 · 天地生综合研究进展. 北京：中国科技出版社
张建国，吴静和. 1996. 现代林业论. 北京：中国林业出版社
张建华，朱靖. 1993. 自然保护区评价研究的进展. 农村生态环境，(2)：5~10
张金屯，Pickett，AST. 1999. 城市化对森林植被、土壤和景观的影响. 生态学报，19(5)：654~658
张金屯. 1987. 芦芽山森林群落优势植物竞争与群落的演替. 山西大学学报(自然科学版)，(2)：83~87
张金屯. 1989. 山西芦芽山植被垂直带的划分. 地理科学，9(4)：346~353

张金屯. 1993. 北斯诺敦山地草地生态. 北京：中国科学技术出版社
张金屯. 1995. 植被数量生态学方法. 北京：中国科学技术出版社
张金屯. 1998. 典范主分量分析及其在山西高原植被与气候关系分析中的应用. 地理学报，56(3)：256~263
张金屯. 1998. 全球气候变化对自然土壤碳、氮循环的影响. 地理科学，18(5)：463~471
张金屯. 1999. 复合农林业及其在黄土高原地区的实践. 北方植物学研究, (3)：80~82
张金屯. 1999. 论生物多样性保护与可持续发展. 经济地理，18(2)：70~75
张金屯. 1999. 全球气候变化及对农业的影响. 环境与开发，14(4)：5~9
张金屯. 2000. 黄土沟壑区小流域治理中的生态学理论及应用. 山西大学学报，23(增刊)：18~21
张金屯. 2001. 山西高原草地退化及其防治对策. 水土保持学报，15(2)：49~52
张坤民等. 1999. 可持续发展论. 北京：中国环境出版社. 11~15，27~31，231~232
张沁文等. 1985. 农村发展研究与思考. 北京：农村读物出版社
张新时. 1989. 植被的 PEP(可能蒸散)指标与植被—气候分类(二). 几种主要方法与 PEP 程序介绍. 植物生态学与地植物学报，13(4)：107~207
张新时. 1989. 植被的 PEP(可能蒸散)指标与植被—气候分类(一). 几种主要方法与 PEP 程序介绍. 植物生态学与地植物学报，13(1)：1~9
张新时. 1993. 研究全球变化的植被—气候分类系统. 第四纪研究, (2)：157~169
张新时等. 1993. 植被的 PEP(可能蒸散)指标与植被——气候分类(三). 几种主要方法与 PEP 程序介绍. 植物生态学与地植物学报，17(2)：97~109
张新时等. 1997. 中国全球变化与陆地生态系统关系研究. 地学前缘，4(1~2)：137~144
张新时主编. 1994. 全球变化与生态系统. 上海：上海科学技术出版社. 1~25
张自和. 2000. 无声的危机——荒漠化与草原退化. 草业科学，17(2)：10~12
章家恩，徐琪. 1999. 恢复生态学研究的一些基本问题探讨. 应用生态学报，10(1)：109~113
章祖同. 1960. 呼伦贝尔草原放牧对饮水点附近植被的影响. 见：东北西部及内蒙古东部第一次草原科学报告会论文集
章祖同等. 1990. 内蒙古草地资源. 呼和浩特：内蒙古人民出版社
赵桂久等. 1993. 生态环境综合整治和恢复技术研究(第一、二集). 北京：北京科学技术出版社
赵弘，郭继丰. 1998. 知识经济呼唤中国. 北京：改革出版社
赵济主编. 1998. 中国自然地理(第三版). 北京：高等教育出版社. 322~342
赵景峰等. 2000. 草原保护和建设是内蒙古长期坚持的绿色工程. 草业科学，17(2)：5~9
赵景柱等. 2000. 生态系统服务的物质量和价值量评价方法的比较分析. 应用生态学报，11(2)：290~292
赵士洞，谷树忠. 1997-11-01. 资源科学与资源可持续利用. 光明日报
赵献英. 1995. 自然保护区在自然资源保护方面的作用和意义. 自然资源学报，10(3)：279~285
赵晓英等. 2001. 恢复生态学——生态恢复的原理与方法. 北京：中国环境科学出版社. 48~50
赵雪，赵爱芬. 2000. 我国草地生态建设与荒漠化防治. 草业科学，17(6)：1~3
赵雪. 1994. 坝上草地旅游业的效益及对脆弱生态环境的影响. 中国沙漠，14(4)：86~91
赵宗慈. 1996. 人类活动与温室气体增加对全球和中国气候变化的影响. 见：气候变化对中国农业的影响. 北京：中国科学技术出版社. 15~16
郑凤英，张金屯等. 1996. 山西草地资源及合理利用. 山地研究，14(1)：33~38
郑师章，吴千红，王海波等. 1994. 普通生态学——原理、方法和应用. 上海：复旦大学出版社
中国科协第二届青年学术年会论文集. 1995. 资源开发、环境变化与持续发展. 北京：中国科学技术出版社
中国科学院可持续发展研究组. 2000. 2000 年中国可持续发展报告. 北京：科学出版社
中国牧区畜牧气候区划科研协作组. 1988. 中国牧区畜牧气候. 北京：气象出版社
中国人与生物圈国家委员会. 1998. 绿色的希望——中国的生物圈保护区. 北京：科学普及出版社
中国人与生物圈国家委员会. 1998. 自然保护区与生态旅游. 北京：中国科学技术出版社
中国自然保护纲要编写委员会. 1987. 中国自然保护纲要. 北京：中国环境科学出版社
中国自然资源研究会. 1985. 自然资源研究的理论与方法. 北京：科学出版社
钟林生，肖笃宁. 2000. 生态旅游及其规划与管理研究综述. 生态学报，20(5)：841~848
钟祥浩，余大富，郑霖等. 2000. 山地学概论与中国山地研究. 成都：四川科学技术出版社
周广胜，张新时. 1995. 全球变化的中国自然植被的净第一性生产力研究. 植物生态学报，20(1)：9~17

周广胜，张新时. 1995. 自然植被的净第一性生产力模型初探. 植物生态学报，19(3)：193~200

周广胜，张新时. 1996. 全球变化的中国气候——植被分类研究. 植物学报，38(1)：8~17

周广胜，张新时. 1996. 中国气候—植被关系初探. 植物生态学报，20(2)：113~119

周广胜等. 1997. 中国植被对全球变化反应的研究. 植物学报，39(9)：879~888

周国梅. 1998. 清洁生产的环境经济学分析. 北京：气象出版社. 57~61

周禾，陈佐忠，卢欣石. 1999. 中国草地自然灾害及其防治对策. 中国草地, (2)

周鸿. 2001. 人类生态学. 北京：高等教育出版社

周纪伦，郑师章，杨持. 1992. 植物种群生态学. 北京：高等教育出版社

周庆强等. 1985 内蒙古草场鼠害的基本特征及其生态对策. 兽类学报，5 (4)：241~249

周寿荣. 1996. 草地生态学. 北京：中国农业出版社

朱国伟. 2001. 第三产业推行清洁生产初探. 中国人口.资源与环境，11(3)：104~106

朱丽兰. 1998. 知识经济的兴起与挑战. 中国人口、资源与环境，8(3)

朱利安・林肯・西蒙著. 1985. 没有极限的增长. 黄江南译. 成都：四川人民出版社. 45，223

朱训. 1999. 地学哲学文库・地球科学与可持续发展. 北京：中国科学技术出版社

朱永达. 1993. 农业系统工程. 北京：农业出版社

朱震达，赵兴梁等. 1998. 治沙工程学. 北京：中国环境科学出版社

祝廷成，钟章成，李建东. 1989. 植物生态学. 北京：高等教育出版社

祖莉莉. 1998. 从人类社会科技的发展看资源的定义域. 资源科学，20(2)：17~21

祖元刚. 1987. 羊草种群的能量流动及其稳定性分析. 植物学报，29(2)：95~103

Aarne Vesilind P. 1975. Environmental pollution and control. Ann ARBOR Science

Axelsson-Lindgren C. 1987. Public response to differences between visually distinguishable forest stands in a recreational area. Landscape and Urban Planning，14(3)：211~217

Batchelor P, lewis D. 1985. Urban Design in Action. Raleigh：North Carolina State University Press

Begon M，Harper J L，Townsend C R. 1996. Ecology，Individuals Populations and Communities. Boston：Blackwell Scientific Publication

Bernal J D. 1959. 历史上的科学. 伍况甫等译. 北京：科学出版社. 459

Bickoff E M. 1968. Oestrogenic constituents of forage plants. Rev. Ser. 1. Commonwealth Agricultural Bureau

Boo E. 1991. Planning for ecotourism. Parks，2(3)：4~8

Boudling K E. 1966. The Economics of the Coming Spaceship, Earth. Maryland：Johns Hopkins Press.3~4

Brain Clouston. 1992. 风景园林配置. 陈自新，许慈安译. 北京：中国建筑工业出版社

Brouwer F *et al* 1988. Modeling environmental — economic phenomena at a regional level. Journal of Environment System. Methodological progress，18(4)：317~340

Burgess R L，Sharpe D M eds. 1981. Forest Island Dynamics in Man-dominated Landscapes. New York：Spring-Verlag

Burrough P A. 1986. Principles of Geographical Information Systems for Natural Resource Analysis. Oxford：Oxford University Press

Calderbank G. 1963. Animal health，production and pasture(editorsWorden A N，Sellers K C and Tribe D E). chapter 27. London：Longman

Cloke P J，Park C C. 1985. Rural resource management. Croom Helm, 184~225

Cole D N. 1978. Estimating the susceptibility of wild land vegetation to trailside alteration. Journal of Applied Ecology，15：281~286

Cole D N. 1990. 游憩生态学：现状与地理学家应有的贡献. 赵抱力译. 地理译报, (2)：18~21

Crawley M J. 1986. Plant Ecology. Oxford：Blackwell Scientific Publications

Davies W. 1960. The Grass Crop. 2nd ed. London：Spon

Deveaux D. 1976. Repartition et diversite des peuplements en carabiques en zone bocagere et arasee. In Les Bocages：Histoire. Ecologie. Economic. Institut Nationale de la Recherché Agronomique. Center National de la Recherché Scientifique. France：Universite de Rennes. Rennes

Emanuel W R，Shugart H A and Stevenson M P. 1985. Climatic change and the broad-scale distribution in terrestrial ecosystem complexes. Clim. Change, (7)：9~43

Eyles D E. 1963. Animal health，production and pasture(editors Worden A N，Sellers K C and Tribe D E). chapter 12. London：Longman

Ferguson W S. 1963. Animal health，production and pasture(editors A N Worden，K C Sellers and Tribe D. E.). chapter 4. London：Longmans

Forman R T T, Shmida A. 1986. Landscape Ecology. New York：John Wiley

Forman R T T，Gordan M. 1990. 景观生态学. 肖笃宁等译. 北京：科学出版社

Forman R T T. 1983. Corridors in a landscape：their ecological structure and function. Ekologia(CSSR)

Forman R T T. 1995. Land Mosaics, the Ecology of Landscapes and Regions. Cambridge：The Cambridge University Press

Francois Romade. 1984. Ecology of Natural Resources. Translated by Duffin W. T.

Frost J E. 1988. Can visitor regulation enhance recreational experiences. Environment Manage，12(1)：5~9

Garner R J. 1963. Animal health，production and pasture(editors Worden A N, Sellers K C and Tribe D E). chapter 28. London：Longman

Geddes P. 1915. Cites in Evolution：An Introduction to the Town Planning Movement and the Study of Civicis. New York：Howard Fertig

Gosling D，Maitland B. 1984. Concepts of Urban Design. London：Academy Editions

Greed C. 1996. Investigating Town Planning：Changing Perspectives and Agendas. London：Longman

Harper J L. 1977. Population Ecology of Plants. New York：Academic Press

Harris L D. 1984. The Fragmented Forest：Island Biogeography Theory and the Preservation of Biotic Diversity. Chicago：The University of Chicago Press

Harrison Matthews L. 1952. British Mammals. London：Collins

Hasan Zafer Dogan. 1989. Forms of adjustment：sociocultural impacts of tourism. Annals of Tourism Research，16(2)：216~232

Hiroki M. 1992. Effects of heavy metal contamination on soil microbial population. Soil Sc. Plant Nut

Horton C. 1979. A Closer Look at Grasslands. New York, Toronto：Gloucester Press

Howard E. 1898. Garden cites of tomorrow. London Faber and Faber.

Hu D，Wang R S. 1997. A Chinese approach to ecological design methodology. Proceedings of Catalyst'97 Conference on Design Eco-solution. An International Conference at University of Canberra, Australia. Dec. 5~8

Hutchinson G E. 1961. The paradox of the plankton. American Naturalist

IPCC. 1990. Climate Change：The IPCC scientific assessment. Cambridge：The Cambridge University Press

Juanita C Liu，Turgut Uar. 1986. Resident Attitudes Toward tourism Impacts in Hawaii. Annals of Tourism Research，13(2)：193~214

Kaplan R *et al.* 1988. Ethnicity and preference for natural settings：A review and recent findings. Landscape and Urban Planning，15(2)：107~111

Kormondy E J. 1996. Concepts of Ecology4nd ed. Englewood Cliffs：Prentice Hall. Par. VI

Kuss F R *et al.* 1986. A first alternative for estimating the physical carrying capacities of natural areas for recreation. Environment Manage，10(2)：255~262

Lande R. 1987. Extinction thresholds in demographic models of temperate-zone trends in evolution and ecology

Lawrence R, Allen Harry R, Hafer Patrick, Long T et al.. 1993. Rural Residents' Attitudes Toward Recreation and Tourism Development. Journal of Travel Research，16(spring)：27~32

Leduc J P. 1979. Le role du bocage. Recherché et Nature

Levins R. 1968. Evolution in Changing Environments. Princeton：Princeton University Press

Lindenmay D B，Nix H A. 1993. Ecological principles for the design of wildlife corridors. Conservation Biology, (7)：627~630

Long T, Richard R Perdue, Lawrence Allen. 1990. Rural Resident Tourism Perceptions and Attitudes by Community Level of Tourism. Journal of Travel Research，13(winter)：3~9

Lucien Fangers. 1990. 资源问题的历史、现状和未来. 地理译报, (2)

Manuel C · Molles,Jr. 2000. 生态学：概念与应用. 北京：科学出版社

Mathieson A.，Wall G. 1982. Tourism：Economic, Physical and Social Impacts. London：Longman

McDonald P，Edwards R A and Greenhalgh J F D. 1966. Animal Nutrition. Edinburgh：Oliver & Boyd

Meffe G，Carrolk. 1994. Principles of Conservation Biology. Sunderland：Sinauer Associates, Inc.

Miller R I., Harris L D. 1977. Isolation and extirpation in wildlife reserves. Biological Conservation, (12): 311~315

Mitsch W J, Jorgensen. S E 1979. Ecological engineering: An Introduction to Ecotechnology. New York: John Wiley & Sons

Mueller-Dombois D, Ellenberg H. 1974. Aims and Methods of Vegetation Ecology

Napier T L. 1986. An assessment of uses made of a multipurpose reserve. Water Resources Bulletin, 22(1): 11~18

Naveh Z, Lieberman A S. 1984. Landscape ecology-theory and application. New York: Spring-Verg

Noss R F, Cooperrider A Y. 1994. Saving Nature's Legacy: Protecting and Restoring Biodiversity. Washington D C: Island Press.

Noss R F, Harris L D. 1986. Nodes networks and MUMs: Preserving diversity at all scales. Environment Management, (10): 299~309

Noss R F. 1991. Landscape connectivity: different functions at different scales. In: Hudson WE ed. Landscape Linkages and Biodiversity. Washington: Island Press. 27~39

Odum E P. 1971. Fundamentals of Ecology. Philadelphia: Saunders W B

Odum E P. 1981. 生态学基础. 孙儒泳等译. 北京：人民教育出版社

Odum E P. 1997. Ecology—A Bridge between Science and Society. Sunderland: Sinauer Associates Inc.

Odum H T. 1983. Systems Ecology: An Introduction .New York: John Wiley & Sons

OECD. 1987. Our Common Future. Oxford: Oxford University Press

Oodeman. 1981. World map of the status of human—induced soil degradation. An explanatory note. Wageningen: International Soil Reference and Information Center / Nairobi. United Nations Environment Programme

Ovington J D. 1963. Adv. Ecol. Res. (1): 103~203

Paul Hawken 著. 2001. 商业生态学. 夏善晨等译. 上海：上海译文出版社

Phillipson A T. 1963. Animal health, production and pasture(editors Worden A N, Sellers K C and Tribe D E). chapter 7. London: Longman

Post W M, Emanuel W R, Zinke P J and Stagenberger A G. 1982. Soil carbon pools and world life zones. Nature, 156~159

Quinn J F, Hastings A. 1987. Extinction in subdivided habitats. Conservation Biology, (1): 198~208

Ramade. 1984. Ecology of Natural Resources. New York: John Wiley & Sons

Riffkin J, Howard T. 1987. 熵：一种新的世界观. 吕明译. 上海：上海译文出版社. 86

Risser J R, Karr R T T, Forman. 1984. Landscape Ecology: Directions and Approaches. Champaign: Illinois Natural History Survey Special Publication.

Scott J M, Davis F et al. 1993. Gap analysis: a geographical approach to protection of biological diversity. Wildlife Monographs, 123: 1~41

Simmons I G. 1974. The Ecology of Natural Resources. London Edward Arnold(Publishers)Ltd.

Snaydon R W. 1987. Ecosystems of the World(17B) Managed Grasslands Analytical Studies. Elsevier Science Publishing Company Inc. USA

Snowman M R. 1987. A procedure for assessing recreational carrying capacity of coastal resort. Landscape and Urban Planning, 14(4): 331~344

Spedding C R W. 1969. Crop grasses and legumenes in British agriculture. Common Wealth Agricultural Bureau(in press)

Spedding C R W 著. 1983. 草地生态学. 贾慎修，孙鸿良，毛雪莹等译. 北京：科学出版社

Sutherland W J 等. 1999. 生态学调查方法手册. 张金屯译. 北京：科学技术文献出版社

Swith R L. 1990. Ecology and Field Biology. 4th ed. New York: Harper Collins Publishers

Tansley A C. 1935. The use and misuse of vegetational terms and concepts. Ecology, 16: 284~307

Tansley A G. 1939. The British Islands and Their Vegetation. Cambridge: The Cambridge University Press

Tribe D E, Freer M, Coombe J B. 1963. Animal health, production and pasture(editors Worden A N, Sellers K C and Tribe D E) chapter 4. London: Longman

Troll C. 1983. 景观生态学. 林超译. 地理译报, (3)

Underwood E J. 1962. Trace Elements in Human and Animal Nutrition2nd ed. New York: Academic Press

UNEP. 1992. World Environments. United Nations Environment Programme

UNESCO. 1987. A Practical Guide to Man and the Biosphere(MAB)Programme. 6

Ungush K Park. 1997. 环境保护与亚洲经济发展. 产业与环境，19(3)：37~39

Vitousek P M. 1994. Beyond global warming: ecology and global change. Ecology, (75): 61~76

Wang Xiangrong. 1998. Ecological Planning and Sustainable Development：a case study of an urban development zone in Shanghai China. Internation Journal of Sustainable Development and World Ecology

Watson R T et al.(ed.). 1996. Climate Change 1995. Impacts adaptations and mitigation of climate change. Scientific-Technical Analyses Published for the IPCC. New York：Cambridge University Press. 3~10

Wilson D S. 1975. A theory of group selection. Proceedings to National Academy of Sciences USA，72：143~146

Wilson E O. 1988. Biodiversity. Washington D C. USA：National Academy Press

WRI IUCN and UNEP. 1992. Global Biodiversity Strategy. United Nations Environment Programme

WRI. 1989. The Scientific Basis for Conserving Biodivevsity. World Resources Institute, New York

WRI. 1994. World Resources. 1992~1993. World Resources Institute, New York

Wu Jinguo. 1990. Emerging ecological paradigms and sustainable agriculture. In：Proceedings of the 2nd Annual Conference of CAASS. Oregon State University , Corvallis, USA. 74~76

Yan J S，Zhang Y S 1992. Ecological techniques and their application with some case studies in China. Ecological Engineering

Yan X，Zhao S. 1996. Simulating the sensitivity of Changbai Mt forests to climatic change. J Environ Sci (China)，8(3)：357~370

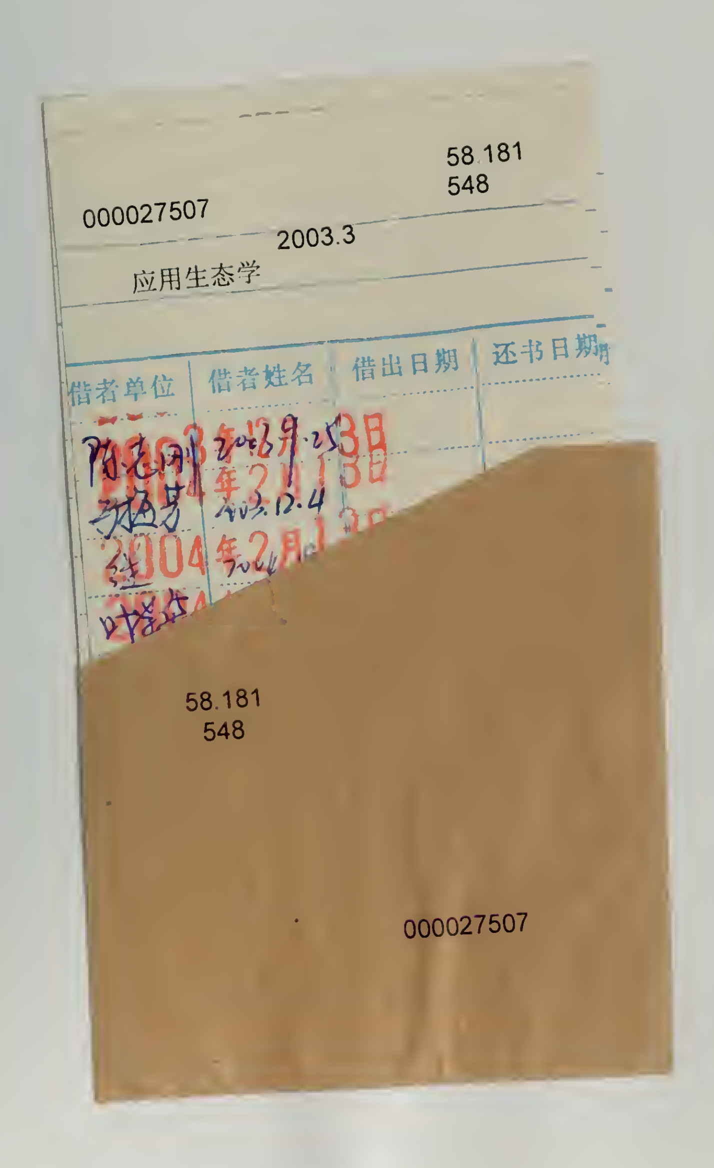
Zhou G，Zhang X. 1995. A New NPP Model. In：Ye D Z et al. eds. China Contribution to Global Change Studies-China Global Change Report No. 2. Chinese National Committee for the International Geosphere-Biosphere Programmes. Beijing：Science Press. 197~202

Лавренко Е М. 1959. 苏联的草原. 祝廷成等译. 北京：科学出版社

Щеников А П. 1959. 苏联的草甸. 张绅译. 北京：科学出版社

Ярошенко П Д. 1959. 植被学说原理. 李继侗译. 北京：科学出版社

Ярошенко П Д. 1966. 地植物学. 付子桢译. 北京：科学出版社


58.181
548
000027507
2003.3
应用生态学
借者单位
借者姓名
借出日期
还书日期
58.181
548
000027507

生命科学图书
http://www.lifescience.com.cn
e-mail:info@lifescience.com.cn





ISBN 7-03-010647-4
定价：78.00元